



HAL
open science

Utilisation de produits non traditionnels pour le traitement des matériaux de terrassement : impact sur les propriétés géotechniques et bilan environnemental

Gaëtan Blanck

► **To cite this version:**

Gaëtan Blanck. Utilisation de produits non traditionnels pour le traitement des matériaux de terrassement : impact sur les propriétés géotechniques et bilan environnemental. Autre. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT : 2013LORR0126 . tel-01750118

HAL Id: tel-01750118

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750118>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITE DE LORRAINE
ÉCOLE DOCTORALE : RP2E
École Nationale Supérieure de Géologie
Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 12/02/2013
pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Lorraine
(Spécialité : Mécanique – Génie Civil)

par

Gaëtan BLANCK

Utilisation de produits non traditionnels pour
le traitement des matériaux de
terrassément : impact sur les propriétés
géotechniques et bilan environnemental

Directeur de thèse : Mme Farimah MASROURI Professeur UDL-ENSG
Co-directeur de thèse : M. Olivier CUISINIER Maître de Conférences UDL-ENSG

Composition du jury :

Rapporteurs : Mme Anne PANTET Professeur, Université du Havre
M. Pascal VILLARD Professeur, Université Joseph Fourier
Examineurs : M. Jean-Pierre GOURC Professeur, Université Joseph Fourier
M. Yves GUERPILLON Directeur Egis Géotechnique
Membres invités : M. Laurent CHATEAU Ingénieur ADEME
M. Emmanuel LAVALLEE Responsable géotechnique DTP
Terrassement

À Maud
À mes parents
À ma famille

Remerciements

Les travaux de recherche ont été réalisés à l'Institut National Polytechnique de Lorraine au sein du Laboratoire Environnement Géomécanique & Ouvrages de l'École Nationale Supérieure de Géologie. Cette thèse de l'agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie a bénéficié de cofinancements de la part d'Egis Géotechnique et de DTP Terrassement.

Je tiens tout d'abord à remercier Mme Farimah Masroui, professeur à l'école de Géologie au sein de l'Université de Lorraine de m'avoir proposé le sujet de thèse à l'issue de mes travaux de master. Merci pour vos encouragements à toujours faire mieux et la confiance que vous m'avez accordée tout au long de ces trois années. Merci à M. Olivier Cuisinier, maître de conférences à l'Université de Lorraine, pour sa grande disponibilité et sa rigueur scientifique qui ont grandement aidé à améliorer la qualité des résultats obtenus et à les analyser sous un regard critique aiguisé. Je n'ai par ailleurs pas oublié ma promesse de faire des bretzels même si celle-ci ne s'est pas encore concrétisée !

Je remercie sincèrement Mme Anne Pantet, professeur à l'Université du Havre et M. Pascal Villard, professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble pour le crédit qu'ils ont apporté à mon travail en acceptant d'être rapporteur. Je remercie de même M. Jean-Pierre Gourc, professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble et M. Yves Guerpillon, directeur d'Egis Géotechnique d'avoir accepté d'être examinateur du mémoire de thèse.

Au cours de cette thèse, un comité de pilotage regroupant les différents partenaires a été créé et s'est régulièrement rencontré afin de discuter des avancées du projet et de ses orientations. Merci à M. Laurent Chateau, ingénieur à l'ADEME pour son implication, ses remarques et commentaires constructifs. Merci à M. Guerpillon et Mme Jatteau d'Egis pour avoir soutenu le projet depuis son début et apporté leur expertise transversale entre les domaines de la géotechnique et de l'environnement. Merci à M. Thierry Mollier et Mme Fabienne Dermenonville d'Egis géotechnique pour leur participation à certaines réunions du comité de pilotage, apportant un regard neuf sur le projet. DTP Terrassement fait également partie des partenaires initiateurs via la conduite de travaux de Master en 2008 et 2009 dont les résultats ont justifié la mise en place d'un projet de thèse. Merci à M. Claude Aimé, pour l'initiation du projet et l'intérêt porté tout au long de son déroulement ainsi qu'à M. Simon Bonne qui a pris le suivi de ce projet en cours de route en lui donnant une nouvelle impulsion. Mes remerciements vont également à M. Emmanuel Lavallée pour la mise en avant des applications pratiques et les nombreuses propositions de pistes de recherche. Merci également à M. Tangi Le Borgne pour les échanges que nous avons eus et l'aide apportée pour l'évaluation environnementale.

Réaliser une thèse contenant un important volet expérimental nécessite de s'appuyer sur du personnel technique de qualité. Merci à M. Éric Lefebvre, M. Romain Cael et

M. Franck Mansuy pour leur aide et leurs conseils. Merci également au personnel technique du Laboratoire Environnement et Minéralurgie M. Frédéric Diot, M. Robert Joussemet, M. Christophe Gauthier et M. Jean-Marie Fischbach, leur aide a été précieuse pour la préparation, séchage, broyage, tamisage et conditionnement des trois tonnes de matériaux nécessaires à la réalisation des essais. Les mesures de tension superficielles également conduites au LEM m'ont été expliquées par M. Frédéric Villieras et M. Emmanuel Pelletier, merci pour vos conseils et pour le temps que vous m'avez accordé.

Les études au microscope électronique à balayage ont été menées dans les locaux d'Egis géotechnique à Seyssins, merci à Mme Alysson Crumbie pour son accueil et les trois journées passées ensemble à conduire les observations.

Les trois années de thèse ont également été l'occasion de réaliser de nombreuses rencontres. Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire et plus largement celui de l'INPL pour leur accueil et les moments échangés ensemble. Merci Monique, Mélanie et Christine pour m'avoir guidé dans les méandres administratifs et l'obscurité de certains dossiers. Merci aux collègues doctorants, post doctorant et ATER, pour toutes les expériences vécues ensemble au laboratoire et en dehors. Merci Emad de m'avoir hébergé dans ton bureau à mon arrivée avant que je ne déménage dans celui de Tiangoua et Romain après le départ de Hung Trong. Merci Romain, tu possèdes des qualités humaines rares, merci aussi pour la motivation salutaire à faire un peu de sport en troisième année de thèse, vélo, natation, nécessaire à une bonne oxygénation du cerveau. Merci également pour ton coup de main pour l'organisation du pot de thèse et de la soutenance.

Je n'oublierai pas non plus les nombreux échanges que j'ai eus avec Guillaume ainsi que le coup de main précieux que tu m'as donné avec ta 205 lors de l'organisation du séminaire des doctorants.

Bonne continuation et fin de thèse à Victor le pianiste mélomane, Hossein dont je jalouse le moule de compactage, Wadoud l'imperméabilisateur des sols mais aussi Kanssounne ainsi que mes cinq camarades de la promo 2009 ayant poursuivi une thèse sur Nancy, Sarah, Hermine, Mathilde, Agathe et Gauthier.

La réussite de la thèse tient également largement au soutien dont j'ai bénéficié de la part de l'ensemble des membres de ma famille. Mes frères Gwenaël et Geoffroy, parents Annick et Denis et grands-parents Céline, Hubert, Marie-Thérèse et Joseph auprès de qui j'ai toujours trouvé les ressources et l'énergie nécessaires pour mener à bien mes travaux. Merci Joseph, pour tes relectures attentives et la chasse impitoyable que tu as menée aux fautes de français. Merci à Tatie, Mamie, Papa Maman et Maud qui ont fait en sorte que le pot de thèse soit une très belle réussite.

Je dois également une fière chandelle à Maud, qui partage ma vie depuis maintenant de nombreuses années. Merci pour le bonheur que tu m'apportes, ton soutien de chaque instant et ta patience.

Enfin, merci à tous ceux qui se sont venus parfois de loin pour m'épauler lors de ma soutenance de thèse malgré la neige et les épidémies de grippe en ce début février 2013.

Sommaire

Table des illustrations	vii
Liste des tableaux	xiii
Liste des abréviations et symboles	xvii
Introduction générale	1
Chapitre I : Produits non traditionnels : propriétés techniques et méthodes d'évaluation environnementales	5
I.1 Introduction	7
I.2 Les sols : nature et classification.....	7
I.2.1 Nature.....	7
I.2.2 Classification du GTR	10
I.3 Les traitements des sols, problématiques et enjeux	11
I.3.1 Objectifs des traitements	12
I.3.2 Produits traditionnels : chaux et liants hydrauliques.....	12
I.3.3 Produits non traditionnels	13
I.3.4 Sélection des catégories de produits	15
I.4 Traitement avec des produits non traditionnels	16
I.4.1 Utilisations des produits non traditionnels	16
I.4.2 Traitement de sols avec des produits organiques acides	17
I.4.2.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques	17
I.4.2.2 Effets observés pour une mise en œuvre <i>in situ</i>	20
I.4.2.3 Mode d'action sur les sols	21
I.4.2.4 Apport des traitements acides	23
I.4.3 Traitement de sols avec des produits enzymatiques.....	23
I.4.3.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques	23
I.4.3.2 Effets observés pour une mise en œuvre <i>in situ</i>	26
I.4.3.3 Mode d'action sur les sols	26
I.4.3.4 Apport des traitements enzymatiques.....	27
I.4.4 Traitement de sols avec des lignosulfonates	28
I.4.4.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques	28
I.4.4.2 Effets observés pour une mise en œuvre <i>in situ</i>	31
I.4.4.3 Mécanisme d'action.....	31
I.4.4.4 Apport des traitements aux lignosulfonates	33
I.4.5 Implications techniques et environnementales des traitements non traditionnels	33

I.5	Méthodologies d'évaluation environnementale	34
I.5.1	Définition et principe de l'analyse du cycle de vie selon ISO 14040	35
I.5.1.1	Objectif et champ de l'étude	35
I.5.1.2	Inventaire du cycle de vie	37
I.5.1.3	Évaluation des impacts	37
I.5.1.4	Interprétation	40
I.5.2	Approche de la norme NF P 01-010	40
I.5.2.1	Définition des étapes du cycle de vie.....	40
I.5.2.2	Méthode de calcul des indicateurs	41
I.5.3	État de l'art dans le secteur de la construction.....	42
I.5.3.1	Bâtiments et ouvrages d'art.....	42
I.5.3.2	Terrassements et ouvrages linéaires.....	44
I.5.4	Bilan	47
I.6	Conclusion	47
 Chapitre II : Caractéristiques des sols et des produits de traitement		49
II.1	Introduction.....	51
II.2	Protocoles expérimentaux	51
II.2.1	Procédure de traitement	51
II.2.1.1	Produits liquides.....	52
II.2.1.2	Produit solide	52
II.2.1.3	Spécificités selon la nature des sols.....	52
II.2.2	Essais géotechniques.....	53
II.2.2.1	Propriétés hydromécaniques.....	53
II.2.2.2	Caractéristiques d'identification	55
II.2.3	Essais de caractérisation de la microstructure	56
II.2.3.1	Microscopie électronique à balayage.....	56
II.2.3.2	Porosimétrie par intrusion de mercure.....	56
II.2.4	Mesure de la tension superficielle.....	57
II.3	Caractéristiques des produits non traditionnels	58
II.3.1	Choix des dosages	58
II.3.2	Produit organique acide.....	59
II.3.3	Produit enzymatique	61
II.3.4	Lignosulfonate de calcium	64
II.3.5	Caractéristiques des produits testés	65
II.4	Caractéristiques des sols non traités	66
II.4.1	Limon de Moussy	66
II.4.2	Argile de Couthenans	71
II.4.3	Sables rhénans.....	74

II.4.4 Synthèse des propriétés géotechniques des sols	76
II.5 Caractéristiques des sols traités avec des produits traditionnels	77
II.5.1 Procédures de traitement.....	77
II.5.2 Résultats expérimentaux	77
II.5.2.1 Traitement du limon à la chaux.....	78
II.5.2.2 Traitement de l'argile à la chaux.....	81
II.5.2.3 Traitement du limon au ciment	83
II.5.3 Synthèse des propriétés géotechniques des sols traités avec des produits traditionnels	84
II.6 Bilan	84

Chapitre III : Effets des traitements non traditionnels sur les propriétés géotechniques des sols : recherche des applications potentielles 87

III.1 Introduction.....	89
III.2 Traitement avec une solution enzymatique : Permazyme.....	89
III.2.1 Traitement du limon de Moussy	89
III.2.1.1 Propriétés de compactage.....	90
III.2.1.2 Résistance à la compression simple	96
III.2.1.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique	97
III.2.1.4 Caractéristiques d'identification	98
III.2.1.5 Microstructure du limon traité	98
III.2.1.6 Effet d'une association avec du ciment.....	99
III.2.1.7 Bilan : propriétés géotechniques du limon de Moussy traité	100
III.2.2 Traitement de l'argile de Couthenans	100
III.2.2.1 Propriétés de compactage.....	101
III.2.2.2 Résistance à la compression simple	101
III.2.2.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique	102
III.2.2.4 Caractéristiques d'identification	102
III.2.3 Traitement de sables	102
III.2.4 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie.....	103
III.2.5 Recherche des mécanismes d'action	103
III.2.5.1 Effet des tensioactifs sur les caractéristiques mécaniques	104
III.2.5.2 Mode d'action des tensioactifs.....	105
III.2.5.3 Propriétés tensioactives de la Permazyme	106
III.2.5.4 Traitement du limon au SDS	106
III.2.5.5 Mécanisme d'action de la Permazyme	107
III.2.6 Apport technique et implications environnementales	108
III.2.6.1 Applications potentielles du traitement	108
III.2.6.2 Implications environnementales	110
III.2.6.3 Recommandations d'utilisation du limon de Moussy.....	110
III.2.6.4 Évolution des caractéristiques mécaniques au cours du temps	111

III.3 Traitement au lignosulfonate de calcium	111
III.3.1 Traitement du limon de Moussy	111
III.3.1.1 Propriétés de compactage.....	111
III.3.1.2 Résistance à la compression simple	116
III.3.1.3 Gonflement et conductivité hydraulique.....	117
III.3.1.4 Caractéristiques d'identification	118
III.3.1.5 Microstructure du limon traité	119
III.3.1.6 Effet d'une association avec du ciment.....	120
III.3.2 Traitement de l'argile de Couthenans	122
III.3.2.1 Propriétés de compactage.....	122
III.3.2.2 Résistance à la compression simple	123
III.3.2.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique	124
III.3.2.4 Caractéristiques d'identification	125
III.3.3 Traitement de sables	126
III.3.4 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie.....	127
III.3.5 Recherche des mécanismes d'action	128
III.3.6 Apport technique et implications environnementales	130
III.3.6.1 Applications potentielles du traitement	130
III.3.6.2 Implications environnementales	132
III.3.6.3 Recommandations d'utilisation.....	132
III.3.6.4 Évolution des caractéristiques mécaniques au cours du temps	133
III.4 Traitement au produit acide : ISS	134
III.4.1 Traitement du limon de Moussy	134
III.4.1.1 Propriétés de compactage.....	134
III.4.1.2 Résistance à la compression simple	135
III.4.1.3 Caractéristiques d'identification	135
III.4.1.4 Microstructure du limon traité	136
III.4.2 Traitement de l'argile de Couthenans	137
III.4.2.1 Propriétés de compactage.....	137
III.4.2.2 Résistance à la compression simple	138
III.4.2.3 Caractéristiques d'identification	138
III.4.3 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie.....	139
III.4.4 Discussion sur le mode d'action du traitement	140
III.4.5 Applications potentielles du traitement.....	142
III.5 Conclusion	142
Chapitre IV : Évaluation du bilan environnemental des traitements non traditionnels sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage en terre	145
IV.1 Introduction	147
IV.2 Méthodologie de l'étude environnementale	147

IV.3 Conduite de l'analyse du cycle de vie	149
IV.3.1 Objectif	149
IV.3.2 Définition du système	150
IV.3.2.1 Description des processus entrant dans les différentes phases du cycle de vie	150
IV.3.2.2 Description des hypothèses retenues.....	151
IV.3.3 Inventaire du cycle de vie	153
IV.3.3.1 Calcul des intrants.....	153
IV.3.3.2 ICV des intrants.....	157
IV.3.4 Définition des variantes de mise en œuvre	159
IV.3.5 Évaluation des impacts.....	160
IV.3.5.1 Traitement à la Permazyme	161
IV.3.5.2 Traitement au lignosulfonate	165
IV.4 Étude de sensibilité de l'impact environnemental	168
IV.4.1 Sensibilité par rapport aux caractéristiques initiales du limon	169
IV.4.1.1 Teneur en eau initiale.....	169
IV.4.1.2 Masse volumique sèche visée.....	169
IV.4.2 Influence de la définition de la frontière du système.....	170
IV.4.2.1 Prise en compte de la vie en œuvre	171
IV.4.2.2 Prise en compte de la fin de vie.....	171
IV.4.2.3 Prise en compte de l'ICV de l'eau.....	171
IV.4.3 Influence des paramètres liés au traitement à la Permazyme	172
IV.4.3.1 Champ de l'étude de sensibilité.....	172
IV.4.3.2 Étude de sensibilité pour la situation n°1	175
IV.4.3.3 Étude de sensibilité pour la situation n°2	176
IV.4.3.4 Étude de sensibilité pour la situation n°3	177
IV.4.3.5 Bilan pour le traitement à la Permazyme	178
IV.4.4 Traitement au lignosulfonate.....	179
IV.4.4.1 Champ de l'étude de sensibilité.....	179
IV.4.4.2 Étude de sensibilité pour la situation n°1	180
IV.4.4.3 Étude de sensibilité pour la situation n°2	182
IV.4.4.4 Étude de sensibilité pour la situation n°3	183
IV.4.4.5 Bilan pour le traitement au lignosulfonate.....	183
IV.4.5 Évaluation financière : exemple du traitement à la Permazyme	183
IV.5 Conclusion	185
 Conclusion générale : synthèse des résultats des propriétés géotechniques et du bilan environnemental de l'utilisation de produits non traditionnels de traitement des sols	187
 Références bibliographiques	195

Table des illustrations

Figure I.1 : Organisation des phases constitutives d'un sol.	8
Figure I.2 : Organisation d'une couche tétraédrique (Mitchell, 1993).	9
Figure I.3 : Organisation d'une couche octaédrique (Mitchell, 1993).....	9
Figure I.4 : Structure d'un feuillet T-O de type kaolinite et T-O-T de type montmorillonite (Mitchell, 1993).	10
Figure I.5 : Classification des sols de $D_{max} < 50$ mm selon NF P 11-300 (AFNOR, 1992). L'argilosité des sols marqués d'un astérisque (*) est caractérisée par l'indice de plasticité.	11
Figure I.6 : Résistance à la compression simple après 28 jours de cure pour un limon traité avec un produit acide à différents dosages (Tingle & Santoni, 2003).	18
Figure I.7 : Potentiel de gonflement unidimensionnel de cinq sols traités avec une solution contenant du limonène sulfonaté (Rauch et al. 2002).	19
Figure I.8 : Résistance à la compression simple pour un sol argileux traité avec quatre solutions enzymatiques différentes (Tingle & Santoni, 2003).	24
Figure I.9 : Potentiel de gonflement unidimensionnel de cinq sols traités avec une solution enzymatique (Rauch et al. 2002).	25
Figure I.10 : Formule topologique d'un lignosulfonate de calcium, (69 th JECFA : Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2008).	28
Figure I.11 : Influence du dosage sur la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale pour deux solutions de lignosulfonates (Gow et al. 1961), 1 pcf = 1,6 Mg/m ³	29
Figure I.12 : Résistance à la compression simple après 28 jours de cure pour un limon traité avec un lignosulfonate de calcium à différents dosages (Tingle & Santoni, 2003).	30
Figure I.13 : Enchainement des quatre phases d'une ACV (NF EN ISO 14040, AFNOR 2006a).	36
Figure I.14 : Modélisation d'un système en un ensemble de processus élémentaires.	36
Figure I.15 : Catégories d'impact midpoint et endpoint de la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet et al. 2003).	39
Figure I.16 : Étapes du cycle de vie des matériaux de construction.	41
Figure I.17 : Consommation d'énergie de 60 bâtiments, comparaison entre l'énergie consommée pour les phases de production des matériaux et de vie en œuvre (Sartori & Hestnes, 2007).	44
Figure I.18 : Distribution des impacts environnementaux en fonction des étapes de construction (Li et al. 2010).	45
Figure I.19 : Consommation de ressources et émission de polluants pour les quatre variantes constructives (Mroueh et al. 2001).	46
Figure I.20 : Consommation d'énergie pour différentes variantes de construction de chaussées : FA 1 à 3, cendres volantes ; CC 1 et 2 béton recyclé ; BFS, laitier de hauts-fourneaux ; R1, granulats naturels (Mroueh et al. 2001).	47
Figure II.1 : Damme Proctor automatique et moule CBR positionné (a), dispositif de mesure de la portance (b).	53
Figure II.2 : Presse utilisée pour le compactage par double pistonnage des éprouvettes (a), matériel de confection des éprouvettes (b).	54
Figure II.3 : Dispositif de microscopie électronique à balayage.	56
Figure II.4 : Dispositif de mesure de la tension superficielle ; balance de précision (a), affichage des grandeurs mesurées (b), ordinateur de pilotage de l'expérience (c).	57

Figure II.5 : Bécher contenant la solution dans laquelle l'anneau de platine est plongé (a), les valeurs indiquées en (b) correspondent de haut en bas à la tension superficielle mesurée (mN/m), l'enfoncement de l'anneau par rapport à la surface du liquide (mm), la température de la pièce (°C).....	57
Figure II.6 : Récipient contenant l'ISS (a), aspect de la solution concentrée (b) et diluée à 1,0 g/L (c).	60
Figure II.7 : Récipient ayant servi à la conservation de la Permazyme (a), aspect de la solution concentrée (b) et diluée à 1,0 g/L (c).	62
Figure II.8 : Aspect du lignosulfonate de calcium en poudre.	64
Figure II.9 : Courbe granulométrique du limon obtenue par tamisage par voie humide (diamètres > 80 µm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 µm).	67
Figure II.10 : Courbes de compactage et de portance du limon non traité.	68
Figure II.11 : Images MEB du limon non traité, vue d'ensemble.	69
Figure II.12 : Images MEB du limon non traité ; grain de quartz de 30 µm de diamètre recouvert de minéraux argileux (a), zone riche en minéraux argileux (b).	70
Figure II.13 : Images MEB du limon non traité, association entre minéraux argileux et grains de quartz (a et b) montrant générant différentes tailles de pores (flèche sur la photo b). 70	
Figure II.14 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon non traité.	71
Figure II.15 : Courbe granulométrique de l'argile de Couthenans obtenue par tamisage par voie humide (diamètres > 80 µm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 µm).	72
Figure II.16 : Courbes de compactage et de portance de l'argile non traitée.	73
Figure II.17 : Courbes granulométriques des deux matériaux sableux obtenues par tamisage par voie humide (diamètres > 80 µm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 µm)).....	75
Figure II.18 : Courbes de compactage et de portance du sable B5 non traité.	75
Figure II.19 : Courbes de compactage et de portance du sable D1 non traité.	76
Figure II.20 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 1,5 % de chaux vive.	78
Figure II.21 : Résistance à la compression simple du limon traité à 1,5 % de chaux après 7 et 28 jours de cure.	79
Figure II.22 : Indices de plasticité du limon traité à 1,5 % de chaux.	79
Figure II.23 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 1,5 % de chaux (b).	80
Figure II.24 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 1,5 % de chaux.	81
Figure II.25 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à 1,5 % de chaux. .	81
Figure II.26 : Résistance à la compression simple de l'argile traitée à 1,5 % de chaux après 7 et 28 jours de cure.	82
Figure II.27 : Indices de plasticité de l'argile traitée à 1,5 % de chaux.	83
Figure II.28 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment.	83
Figure II.29 : Résistance à la compression simple du limon traité à 6 % de ciment CEM I entre 7 et 90 jours de cure.	84
Figure III.1 : Courbes de compactage et de portance pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.	90
Figure III.2 : Courbes de compactage à l'énergie Proctor modifiée (EPM) et à l'énergie Proctor normale (EPN) pour le limon traité à la Permazyme.	91
Figure III.3 : Courbes de compactage et de portance pour le limon traité à la Permazyme compacté à 75 % et 100 % de l'énergie Proctor normale (EPN).	92

Figure III.4 : Courbes de compactage à 75 % de l'EPN du limon traité à la Permazyme et portances mesurées immédiatement après compactage (IPI) et après 7 jours de cure (IP 7j).	94
Figure III.5 : Indice CBR après 4 jours d'immersion (CBR _i 4j) pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.....	94
Figure III.6 : Potentiel de gonflement du limon traité à 0,002 % de Permazyme après 4 jours d'immersion.	95
Figure III.7 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,002 % de Permazyme après 7 et 28 jours de cure.	96
Figure III.8 : Potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité du limon traité à 0,002 % de Permazyme en fonction des caractéristiques de compactage.....	97
Figure III.9 : Indices de plasticité du limon traité à 0,002 % de Permazyme.....	98
Figure III.10 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,002 % de Permazyme (b)..	98
Figure III.11 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.....	99
Figure III.12 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.	101
Figure III.13 : Indices de plasticité de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.....	102
Figure III.14 : Courbes de compactage Proctor normal pour un mélange de 70 % de sable et 30 % de kaolinite traité avec différents tensioactifs (Park et al. 2006).	104
Figure III.15 : Effets du traitement avec une solution de 4% d'AOT sur l'indice CBR immédiat et immergé d'un sable limoneux (Berney et al. 2003).....	105
Figure III.16 : Tension superficielle d'une solution aqueuse de Permazyme et de SDS à différentes concentrations massiques.	106
Figure III.17 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,01 % de SDS et à 0,002 % de Permazyme.....	107
Figure III.18 : Situation de mise en œuvre n°1 ; le limon est humidifié puis compacté à l'énergie Proctor normale.....	109
Figure III.19 : Situation de mise en œuvre n°2 ; le limon est humidifié à une teneur en eau finale identique puis compacté à l'énergie requise pour atteindre la masse volumique sèche visée.....	109
Figure III.20 : Situation de mise en œuvre n°3 ; le limon non traité est compacté intensément à sa teneur en eau in situ, ou traité et compacté à l'énergie Proctor normale.....	110
Figure III.21 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	112
Figure III.22 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,5 % de lignosulfonate.....	113
Figure III.23 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 5,0 % de lignosulfonate.....	113
Figure III.24 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté à 75 % et 100 % de l'énergie Proctor normale (EPN).....	114
Figure III.25 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté après 28 jours de cure.	115
Figure III.26 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,5 ; 2,0 et 5,0 % de lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.....	116
Figure III.27 : Évolution de la teneur en eau des éprouvettes de limon traité à 2,0 % de lignosulfonate au cours du séchage (a), et résistance à la compression simple en fonction du mode de cure (b).....	117

Figure III.28 : Potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate en fonction des caractéristiques de compactage.....	118
Figure III.29 : Indices de plasticité du limon traité à différents dosages en lignosulfonate..	119
Figure III.30 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 2,0 % de lignosulfonate (b)..	119
Figure III.31 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	120
Figure III.32 : Évolution des résistances à la compression simple du limon traité à 6 % de ciment et à 6,0 % de ciment + 2,0 % de lignosulfonate.	121
Figure III.33 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.....	122
Figure III.34 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,5 ; 2,0 et 5,0 % de lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.....	124
Figure III.35 : Teneur en eau des éprouvettes d'argile traitée à 2,0 % de lignosulfonate au cours du séchage (a), et résistance à la compression simple selon le mode de cure (b).	124
Figure III.36 : Indices de plasticité de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.	125
Figure III.37 : Courbes de compactage et de portance du sable B5 traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	126
Figure III.38 : Courbes de compactage et de portance du sable D1 traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	127
Figure III.39 : Tension superficielle d'une solution aqueuse de lignosulfonate à différentes concentrations massiques.....	129
Figure III.40 : Vue de la surface arasée après compactage de l'argile traitée à 5,0 % de lignosulfonate.....	129
Figure III.41 : Situation de mise en œuvre n°1 ; le limon est humidifié puis compacté à l'énergie Proctor normale.....	131
Figure III.42 : Situation de mise en œuvre n°2 ; le limon est humidifié à une teneur en eau finale donnée puis compacté à l'énergie requise pour atteindre la masse volumique sèche visée.	131
Figure III.43 : Situation de mise en œuvre n°3 ; le limon non traité est compacté intensément à sa teneur en eau in situ, ou traité et compacté à l'énergie Proctor normale.....	132
Figure III.44 : Effet de la dégradation ou du lessivage du lignosulfonate sur la masse volumique sèche de la structure compactée.	133
Figure III.45 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,01 % d'ISS.....	135
Figure III.46 : Indices de plasticité du limon traité à 0,01 % d'ISS.....	136
Figure III.47 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,01 % d'ISS (b).	136
Figure III.48 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,01 % d'ISS (b).	136
Figure III.49 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 0,01 % d'ISS.....	137
Figure III.50 : Courbes de compactage et de portance du sol argileux traité à 0,01 % d'ISS.	138
Figure III.51 : Indices de plasticité du sol argileux traité à 0,01 % d'ISS.	139
Figure III.52 : Photo des éprouvettes contenant le limon en suspension dans une solution d'ISS et dans l'eau distillée après deux heures de repos.	141
Figure III.53 : Courbes de sédimentation du limon mis en suspension dans une solution d'ISS et d'HCl.	141
Figure IV.1 : Enchaînement entre la quantification des intrants et le calcul des impacts environnementaux pour les 10 catégories d'impact de la norme NF P 01-010.	148

Figure IV.2 : Schéma du système considéré pour l'évaluation environnementale.....	152
Figure IV.3 : Comparaison des impacts environnementaux entre le traitement à 0,002 % de Permazyme et un compactage à l'énergie Proctor normale du sol non traité.	162
Figure IV.4 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et le compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.	163
Figure IV.5 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et le compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.....	164
Figure IV.6 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.	166
Figure IV.7 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et la variante traitée à la Permazyme en fonction de la masse volumique sèche minimale requise.	170
Figure IV.8 : Contribution de l'impact relatif de chaque phase du cycle de vie à l'impact total de la variante faisant intervenir le traitement à 0,002 % de Permazyme.	173
Figure IV.9 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des variantes traitées à la Permazyme en fonction des différentes hypothèses sur l'ICV du produit.	175
Figure IV.10 : Impacts environnementaux des variantes non traitées en prenant en compte un compactage à 300 % et 170 % de l'EPN et pour les variantes traitées à la Permazyme pour la variante de référence et celle considérant un ICV nul.	177
Figure IV.11 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des variantes traitées à la Permazyme en considérant ou non l'ICV de la Permazyme.	178
Figure IV.12 : Contribution relative de l'impact de chaque phase du cycle de vie à l'impact total de la variante faisant intervenir le traitement à 2,0 % de lignosulfonate.....	179
Figure IV.13 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des deux variantes traitées en considérant le lignosulfonate comme un produit industriel (Référence) ou comme un déchet (ICV = 0).	181
Figure IV.14 : Impacts environnementaux pour la variante non traitée et les variantes traitées au lignosulfonate en fonction des hypothèses sur l'ICV du produit et sur la distance de transport.	182

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des familles de produits dérivant de la transformation de matières premières renouvelables (Maher et al. 2005).	16
Tableau I.2 : Références de compactage à l'optimum Proctor normal de trois sols traités avec un produit acide (Rauch et al. 2003).	18
Tableau I.3 : Variation du potentiel de gonflement tridimensionnel d'un sol argileux suite au traitement avec trois produits acides (Harris et al. 2006).	20
Tableau I.4 : Indices CBR in situ obtenus après traitement avec un produit non traditionnel acide.	21
Tableau I.5 : Références de compactage à l'optimum Proctor normal de trois argiles plastiques traitées avec une solution enzymatique (Rauch et al. 2003).	24
Tableau I.6 : Influence du traitement sur l'indice CBR à l'optimum de compactage pour différents dosages avec deux solutions de lignosulfonates (Gow et al. 1961).	30
Tableau I.7 : Effets de traitements au lignosulfonate sur les indices de plasticité des sols : (+), augmentation, (-) réduction et (=), absence de modification de la caractéristique.	32
Tableau I.8 : Coefficients de conversion à 100 ans pour les trois principaux gaz à effet de serre (NF P01-010).	42
Tableau I.9 : Comparaison des impacts calculés selon la méthode CML 2001 entre une structure de mur en briques et un structure en bois (Monteiro & Freire, 2012).	43
Tableau II.1 : Composition élémentaire de l'ISS déterminée par ICP-MS.	60
Tableau II.2 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques toxiques dans l'ISS et dans les sols agricoles français.	61
Tableau II.3 : Exemple de formulation d'un produit non traditionnel acide (Merritt, 1991).	61
Tableau II.4 : Caractéristiques physico-chimiques de la Permazyme 11X.	62
Tableau II.5 : Composition élémentaire de la Permazyme déterminée par ICP-MS.	62
Tableau II.6 : Comparaison des teneurs en éléments traces toxiques dans la Permazyme et dans les sols agricoles français.	63
Tableau II.7 : Composition déclarée de la solution enzymatique EarthZyme.	64
Tableau II.8 : Caractéristiques physico-chimiques du lignosulfonate de calcium.	65
Tableau II.9 : Résultats des analyses chimiques élémentaires du lignosulfonate de calcium.	65
Tableau II.10 : Synthèse des principales propriétés des produits de traitement non traditionnels étudiés.	66
Tableau II.11 : Principales caractéristiques d'identification du limon.	67
Tableau II.12 : Résultats des analyses chimiques élémentaires du limon.	68
Tableau II.13 : Résultats des analyses chimiques spécifiques du limon.	68
Tableau II.14 : Principales caractéristiques géotechniques du limon.	69
Tableau II.15 : Principales caractéristiques d'identification de l'argile.	72
Tableau II.16 : Résultats des analyses chimiques élémentaires de l'argile.	73
Tableau II.17 : Résultats des analyses chimiques spécifiques de l'argile.	73
Tableau II.18 : Principales caractéristiques mécaniques de l'argile.	74
Tableau II.19 : Principales caractéristiques d'identification des deux matériaux sableux.	74
Tableau II.20 : Synthèse des principales caractéristiques géotechniques des quatre sols étudiés.	76
Tableau II.21 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 1,5 % de chaux vive.	78

Tableau II.22 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du limon traité à la chaux..	79
Tableau II.23 : Caractéristiques de compactage et de portance de l’argile traitée à 1,5 % de chaux.....	82
Tableau II.24 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion de l’argile traitée à la chaux.	82
Tableau II.25 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment CEM I.....	83
Tableau II.26 : Synthèse des principales caractéristiques mécaniques des sols traités à la chaux et au ciment.....	84
Tableau III.1 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon en fonction du dosage en Permazyme.....	91
Tableau III.2 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à la Permazyme pour différentes énergies de compactage.....	92
Tableau III.3 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du limon traité à 0,002 % de Permazyme.....	95
Tableau III.4 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment et à 6 % de ciment + 0,002 % de Permazyme.....	100
Tableau III.5 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion de l’argile traitée à 0,002 % de Permazyme.....	101
Tableau III.6 : Caractéristiques de compactage, potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité de l’argile traitée à 0,002 % de Permazyme.....	102
Tableau III.7 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à différents dosages en lignosulfonate.....	112
Tableau III.8 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté à 75 et 100 % de l’EPN.....	114
Tableau III.9 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	115
Tableau III.10 : Valeur d’adsorption au bleu de méthylène du limon traité à différents dosages en lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.....	118
Tableau III.11 : Évolution du pH du limon en fonction du dosage en lignosulfonate.....	119
Tableau III.12 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment et à 6 % de ciment + 2,0 % de lignosulfonate.....	121
Tableau III.13 : Caractéristiques de compactage et de portance de l’argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.....	123
Tableau III.14 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.....	123
Tableau III.15 : Caractéristiques de compactage, potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité de l’argile traitée à 2,0 % de lignosulfonate.....	125
Tableau III.16 : Valeur d’adsorption au bleu de méthylène de l’argile traitée à différents dosages en lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.....	125
Tableau III.17 : Évolution du pH de l’argile en fonction du dosage en lignosulfonate.....	126
Tableau III.18 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du limon traité à 0,01 % d’ISS.....	134
Tableau III.19 : Grandeurs mesurées après 4 jours d’immersion du sol argileux traité à 0,01 % d’ISS.....	138
Tableau III.20 : pH des différentes solutions lors des essais de sédimentation du limon. ..	142
Tableau III.21 : Synthèse des effets des trois traitements non traditionnels sur les caractéristiques hydromécaniques du limon de Moussy.....	143

Tableau IV.1 : Distances de transport entre le lieu de production et le lieu de mise en œuvre de l'eau et des produits de traitement.	154
Tableau IV.2 : Teneurs en eau initiales, finales et énergie de compactage de chacune des variantes constructives.	159
Tableau IV.3 : Intrants estimés pour la situation considérant le traitement à 0,002 % de Permazyme en remplacement d'un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.....	161
Tableau IV.4 : Intrants estimés pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et pour un compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.....	163
Tableau IV.5 : Intrants estimés pour la situation considérant le traitement à 0,002 % de Permazyme et un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.....	164
Tableau IV.6 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.....	166
Tableau IV.7 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.....	167
Tableau IV.8 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.	168
Tableau IV.9 : Estimation des coûts de la mise en œuvre d'un mètre cube de sol pour le système considéré en fonction des hypothèses portant sur la distance de transport de l'eau, sur son prix d'achat et sur le prix d'achat de la Permazyme.	184

Liste des abréviations et symboles

ACV	Analyse du Cycle de Vie
CBR	Californian Bearing Ratio
CBR _i	California Bearing Ratio après 4 jours d'immersion
CRPG	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
C _U	Coefficient d'Uniformité
$\Delta H/H_0$	Potentiel de gonflement unidimensionnel
D _{max}	Diamètre du plus gros élément d'un sol
d ₁₀	Diamètre correspondant à un passant de 10 %
d ₆₀	Diamètre correspondant à un passant de 60 %
EPN	Energie Proctor Normale
EPM	Energie Proctor Modifiée
GTR	Guide Technique de Réalisation des remblais et des couches de forme
GTS	Guide technique du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
I _p	Indice de plasticité
IPI	Indice Portant Immédiat
IPI _{OPN}	Indice Portant Immédiat à l'Optimum Proctor Normal
IPI _{max}	Indice Portant Immédiat maximal
k	Coefficient de conductivité hydraulique
LAEGO	LABoratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages
LEM	Laboratoire Environnement et Minéralurgie
MEB	Microscopie Electronique à Balayage
R _c	Résistance à la compression simple
ρ_{dOPN}	Masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal
SDS	Sodium Dodecyl Sulfate
VBS	Valeur d'adsorption au Bleu de Méthylène du Sol
w	Teneur en eau pondérale
w _i	Teneur en eau initiale
w _f	Teneur en eau finale
w _{OPN}	Teneur en eau à l'optimum Proctor normal
w _L	Limite de liquidité
w _P	Limite de plasticité

Introduction générale

- Contexte : les terrassements

Les opérations de terrassement visent à modifier le relief d'un terrain pour permettre la réalisation d'ouvrages de génie civil tels que les voies ferrées, routes ou bâtiments. Les matériaux naturels sont extraits de déblais, transportés puis mis en œuvre en remblais. L'ensemble des activités de terrassement en France métropolitaine représentait 15,8 % du chiffre d'affaire des entreprises de génie civil en 2010 (FNTP, 2011).

Parmi les sols extraits, tous ne peuvent pas être utilisés directement comme matériaux de construction, en raison de leur nature ou de leur état hydrique. Il s'agit par exemple de sols dont l'argilosité ou la teneur en eau sont trop élevées, ou au contraire trop faibles par rapport à l'optimum de mise en œuvre. Cependant, ne pas valoriser ces sols nécessite alors de les évacuer et d'avoir recours à des matériaux extraits de carrières ce qui participe à augmenter l'impact environnemental du chantier. Les volumes de sol excédentaires sont alors considérés comme des déchets, induisant une augmentation des coûts liés à leur transport et à leur stockage. À titre d'exemple, selon le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France (2003), les volumes d'excédents générés par les grands chantiers de terrassement sont estimés à environ 10 % du volume total terrassé. Le coût de leur mise en décharge varie de 2 €/t à près de 8 €/t en fonction de la localisation du chantier et des lieux de stockage. En cela, ne pas valoriser au mieux les matériaux présents dans l'emprise du chantier va à l'encontre des principes du développement durable en augmentant l'impact environnemental et le coût des travaux. Conscients de ces problématiques, les principaux acteurs du secteur de la conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, ont signé une convention d'engagement volontaire avec le Ministère en charge de l'écologie (2009). Le texte fixe des objectifs à atteindre d'ici 2020 avec, en particulier, des actions sur la valorisation de l'ensemble des matériaux naturels excavés, mais aussi la réduction de la consommation d'eau et d'énergie des chantiers de terrassement. Répondre à ces objectifs nécessite de développer l'innovation et la recherche dans les domaines de la valorisation des matériaux. Au-delà des aspects uniquement techniques, il est également prévu le développement d'éco-comparateurs, outils d'aide à la décision ayant pour objectif de comparer les variantes de mise en œuvre du point de vue environnemental et d'intégrer plus amplement les aspects du développement durable au cours de la phase de conception. Cette approche est, en particulier, fondée sur les principes de l'analyse du cycle de vie (AFNOR, 2006a) et tend à se généraliser.

Différentes techniques sont applicables pour valoriser les sols. Ingles & Metcalf (1973) classent ces techniques en trois catégories, la stabilisation chimique (ajout de produits liquides ou solides), la stabilisation physique (par ex. thermique ou

électrique) et la stabilisation mécanique. Parmi les méthodes de traitement, la stabilisation chimique permet d'augmenter la proportion de matériaux réutilisables en améliorant leurs caractéristiques mécaniques et en facilitant leur mise en œuvre. Le recours à une solution de traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques est classique en terrassement et concerne à dire d'experts entre 30 et 50 % des sols fins extraits en France métropolitaine. Les sols traités sont alors principalement utilisés en remblai et en techniques routières. En parallèle à ces techniques de traitement, qualifiées par la suite de « traditionnelles », se développe un ensemble de techniques « non-traditionnelles » principalement fondées sur l'utilisation de divers sous-produits industriels et de déchets. Jusqu'à présent, les principaux développements et applications des traitements non traditionnelles ont eut lieu aux Etats-Unis. Leurs principales applications concernent les routes non revêtues et pistes. Le traitement a alors lieu sur de faibles épaisseurs (environ 15 cm) dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols mais aussi de limiter les phénomènes d'érosion (formation de nids de poules, orinérage) et les émissions de poussières générées par le trafic. Bien que les applications concernées par les traitements non traditionnels soient quelque peu différentes de celles des traitements à la chaux ou aux liants hydrauliques, les effets recherchés sont similaires. En effet, l'objectif principal est de faciliter la mise en œuvre des sols et d'en améliorer leurs caractéristiques mécaniques pour rendre les structures construites plus durables. En cela, les produits non traditionnels peuvent être considérés à la fois comme des alternatives et comme compléments aux méthodes traditionnelles, leur qualification dépendant principalement des utilisations qui en sont faites.

Au sein des produits non traditionnels peuvent être distingués les produits minéraux (sels ou acides minéraux par exemple) et ceux contenant de la matière organique. Cette seconde catégorie regroupe des produits issus des industries pétrolières, agro-alimentaires ou encore papetières. Une partie des produits non traditionnels dérivent de la transformation de matières premières renouvelables et apparaissent comme de bons candidats dans une optique d'amélioration du bilan environnemental des chantiers de terrassement. La thèse porte ainsi sur l'étude de ce dernier type de produits non traditionnels, tant du point de vue de leur capacité à améliorer les propriétés géotechniques d'un sol que des possibilités de limiter l'impact environnemental des travaux de terrassement grâce à leur utilisation.

- Objectifs

Dans ce contexte, le principal objectif de la thèse est de définir les intérêts techniques et environnementaux de l'utilisation de produits non traditionnels en terrassement. Au cours de cette étude, l'accent est mis sur la combinaison entre ces deux aspects dont la prise en compte devient essentielle dans la conception et la réalisation de projets. Pour répondre à cet objectif, un certain nombre de verrous doivent être levés.

- Le premier verrou est lié au manque de données factuelles relatives aux effets

des traitements sur les caractéristiques géotechniques des sols et leur évolution au cours de la vie de l'ouvrage.

- Un second verrou est relatif au manque de connaissance des mécanismes d'action et des interactions microscopiques entre les particules du sol et les produits de traitement. La compréhension du mode d'action des produits non traditionnels permettra notamment de proposer des recommandations d'utilisation (type de matériau, conditions de mise en œuvre, etc.) pour une performance optimisée.
- Enfin, le troisième verrou concerne les aspects environnementaux liés à l'utilisation des produits non traditionnels. En effet, aucune étude n'a été entreprise pour quantifier les effets de l'utilisation de ces produits sur le bilan environnemental des opérations de traitement des sols.

La levée des différents verrous, nécessite la mise en œuvre d'une démarche multi-échelle et multicritère pour comprendre les couplages entre les processus physico-chimiques microscopiques et les propriétés géotechniques macroscopiques du sol traité au sein de l'ouvrage. De plus, l'évolution actuelle des pratiques de terrassement nécessite de ne plus se limiter aux seuls aspects techniques du traitement mais d'inclure les aspects environnementaux dans la prise de décision. Il est notamment nécessaire de recenser les pratiques actuelles et les outils disponibles pour mener une telle étude. Dans cette étude, une méthode d'évaluation environnementale globale de type analyse du cycle de vie est appliquée pour vérifier la compatibilité de l'utilisation de produits non traditionnels avec les aspects environnementaux. Au-delà du simple calcul des bilans environnementaux, il s'agit également d'adapter la démarche pour prendre en compte les spécificités des produits non traditionnels.

- Structure du mémoire

Le mémoire s'articule en quatre chapitres.

Le premier chapitre dresse un état des lieux des pratiques actuelles des traitements non traditionnels. Parmi l'ensemble des traitements, trois catégories de produits sont retenues pour leur compatibilité *a priori* avec les objectifs de l'étude. Les données bibliographiques recueillies permettent de caractériser les effets de ces produits sur les propriétés géotechniques des sols tout en identifiant celles dont la caractérisation fait défaut.

Le second chapitre expose la démarche retenue et détaille les caractéristiques des produits et des sols testés. L'ensemble des protocoles utilisés y est défini. Les résultats obtenus pour les traitements à la chaux et au ciment sont exposés dans l'optique de mettre en perspectives les effets des traitements non traditionnels.

Les résultats expérimentaux obtenus pour les trois produits non traditionnels retenus dans cette étude sont présentés dans le troisième chapitre. Ce chapitre comprend également une réflexion sur les modes d'action des produits, fait un point sur leurs

applications potentielles et pointe leurs principaux effets sur le bilan environnemental.

Enfin, le quatrième chapitre a pour principal objectif de calculer le bilan environnemental pour les différentes situations de mise en œuvre définies dans le chapitre précédent. Les résultats doivent notamment permettre de caractériser et de quantifier les impacts environnementaux de l'utilisation des produits non traditionnels sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages en terre.

Chapitre I :

Produits non traditionnels : propriétés techniques et méthodes d'évaluation environnementales

I.1 Introduction

Les techniques de traitements des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques représentent une façon courante de valoriser les matériaux présentant des caractéristiques géotechniques non satisfaisantes. Ces méthodes sont désignées comme « traditionnelles ». Il existe également une grande diversité de traitements « non traditionnels » mis en œuvre dans des contextes spécifiques. Certains de ces produits, du fait de leurs aspects renouvelables et de leurs impacts environnementaux *a priori* limités pourraient également participer à améliorer le bilan environnemental des chantiers. Cependant, les connaissances relatives aux effets et modes d'action de ces produits sont limitées. Caractériser les utilisations de tels produits et leurs impacts sur le bilan environnemental des chantiers de terrassement nécessite d'identifier les principales catégories de produits, de dresser un état de l'art de leurs utilisations et des techniques d'évaluation environnementales permettant de définir l'impact de chaque traitement.

L'objectif de ce chapitre bibliographique est de rappeler brièvement la composition des sols et le rôle spécifique des minéraux argileux du fait de leur sensibilité aux changements des conditions du milieu induites par les traitements. Est également rappelée la classification des sols utilisée au niveau national et reprise dans l'ensemble du document. Dans une seconde partie sont exposés les différents types de traitements traditionnels et non traditionnels, leur nature et leurs principales utilisations. La connaissance des catégories de produits, de leurs origines et de leurs principales caractéristiques, permet alors de sélectionner trois familles de produits ayant *a priori* un impact positif sur le bilan environnemental des opérations de traitement des sols.

I.2 Les sols : nature et classification

Le comportement des sols est régi par différents paramètres relatifs à leur composition, le premier point de cette partie propose une description de ces constituants. Dans l'optique de définir des catégories de sols en vue de leur utilisation comme matériaux de construction, certaines classifications ont été proposées. La classification proposée dans le guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme GTR (LCPC-SETRA, 2000) a été utilisée lors de cette thèse. Une brève description est effectuée dans une seconde partie.

I.2.1 Nature

Les sols sont composés de trois phases. Un squelette solide constitué de grains minéraux, et deux phases fluides : une phase aqueuse et une phase gazeuse

remplissant l'ensemble des vides entre les grains. Lorsque le sol est non saturé, l'eau est présente soit sous forme d'eau liée aux grains ou d'eau capillaire formant des ménisques. Le sol est dit saturé lorsque l'ensemble des vides est occupé par de l'eau, par exemple sous nappe (Figure I.1).

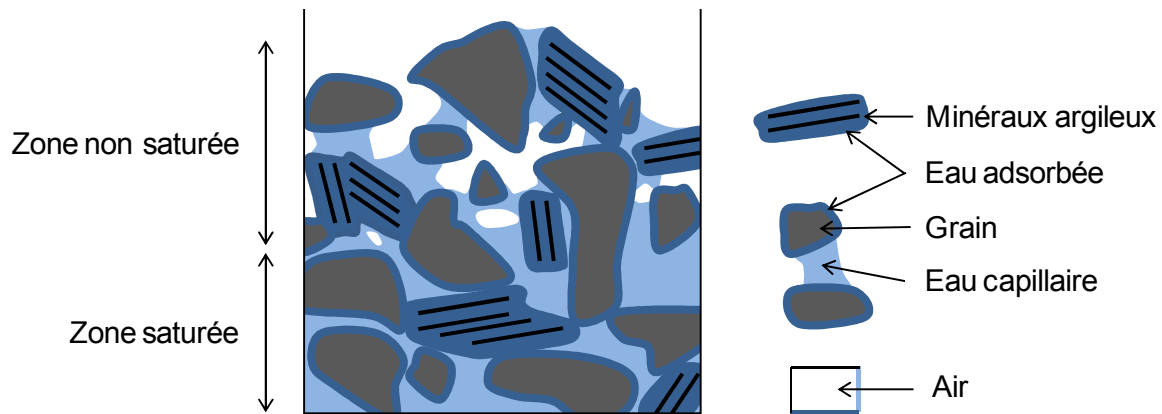


Figure I.1 : Organisation des phases constitutives d'un sol.

La composition du sol, les caractéristiques géométriques des grains et les propriétés physico-chimiques des fluides conditionnent le comportement des sols. Les grandes familles minéralogiques sont présentes dans les sols, les minéraux les plus abondants étant issus de la famille des silicates, des carbonates et des oxydes. Les minéraux de la famille des tectosilicates (quartz, feldspaths, etc.) et des carbonates (calcite, dolomite, etc.) sont solubles mais leur organisation est peu sensible aux conditions physico-chimiques des phases fluides. Au contraire, les phyllosilicates (micas, smectites, kaolinites, etc.) du fait de leur structure en feuillets et de leur composition chimique sont plus sensibles aux conditions du milieu et sujets à des réorganisations en cas de modification de ces conditions (par ex. Palomino & Santamarina, 2005). Ces changements peuvent alors modifier le comportement mécanique du sol (par ex. Chen *et al.* 2000 ; Di Maio *et al.* 2004). La caractérisation de la nature et de la structure des minéraux argileux est de ce fait essentielle à la compréhension du comportement hydromécanique des sols.

Les minéraux argileux font partie de la famille des phyllosilicates hydratés. Ces minéraux ont pour caractéristiques communes leurs unités de base formées d'un tétraèdre organisé autour d'un atome de silicium et d'un octaèdre organisé autour d'un atome d'aluminium. Chacune de ces structures s'associe en couches bidimensionnelles (Figure I.2 et Figure I.3). Au sein de ces couches, les atomes de silicium et d'aluminium peuvent être remplacés par des ions de diamètres ioniques équivalents, il s'agit alors de substitutions isomorphes. Ainsi, les atomes de silicium (Si^{4+}) des tétraèdres peuvent être remplacés par des atomes d'aluminium (Al^{3+}) de rayon ionique équivalent. Quant à l'aluminium (Al^{3+}) des octaèdres, sa substitution par du magnésium (Mg^{2+}) ou du fer (Fe^{3+}) est notamment fréquente dans les smectites.

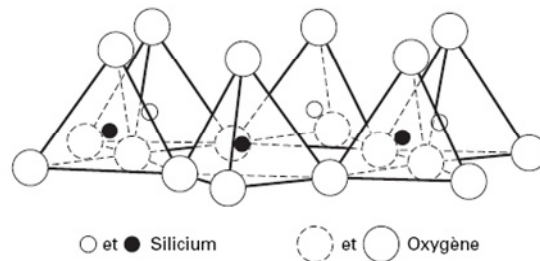


Figure I.2 : Organisation d'une couche tétraédrique (Mitchell, 1993).

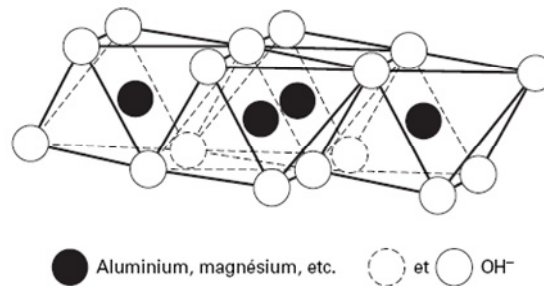


Figure I.3 : Organisation d'une couche octaédrique (Mitchell, 1993).

En fonction de la composition des feuillets formés de couches tétraédriques et octaédriques, deux grandes catégories de minéraux argileux sont distinguées.

- Les minéraux de la famille de la kaolinite sont composés de l'association d'une couche tétraédrique (T) et d'une couche octaédrique (O) formant un feuillet T-O (Figure I.4). Des liaisons faibles de type hydrogène lient les feuillets entre eux, créant des empilements pouvant atteindre une centaine d'individus.
- Les minéraux de la famille des illites, chlorites et smectites sont composés d'une association de deux couches tétraédriques de part et d'autre d'une couche octaédrique et s'organisent ainsi en feuillets de type T-O-T (Figure I.4). Des substitutions isomorphes ont lieu au sein des feuillets créant un déséquilibre de charge compensé par des cations. Selon la nature des éléments substitués et la fréquence des substitutions sont distingués plusieurs types de minéraux allant des illites dont les substitutions sont peu nombreuses aux smectites pour lesquelles l'ensemble des feuillets présente de nombreuses substitutions.

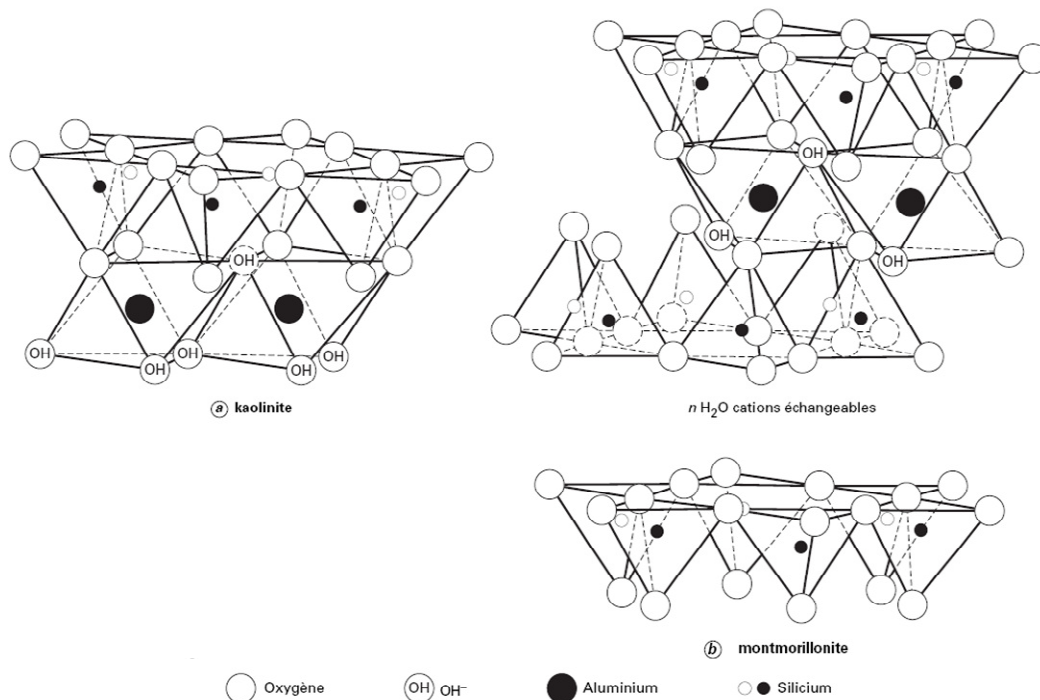


Figure I.4 : Structure d'un feuillet T-O de type kaolinite et T-O-T de type montmorillonite (Mitchell, 1993).

Lorsque les feuillets présentent des déficits de charge dus aux substitutions isomorphes, des cations compensateurs et de l'eau se lient de façon faible aux minéraux argileux en emplissant l'espace interfoliaire. Ces cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) forment alors une couche diffuse dont l'épaisseur dépend de l'équilibre des forces établi entre les ions et le feuillet. Ces cations sont échangeables, ainsi une modification de composition chimique du milieu ou de la quantité d'eau présente dans l'espace interfoliaire peut engendrer une variation dans l'organisation des feuillets et une augmentation de la distance interfoliaire.

Par ailleurs, des charges électriques sont présentes aux extrémités des feuillets du fait de l'interruption de leur structure. Ces charges, sensibles aux conditions de pH peuvent jouer un rôle dans les phénomènes d'agrégation et de floculation des minéraux argileux (par ex. Palomino & Santamarina, 2005) en particulier la famille des kaolinites pour lesquelles l'essentiel des charges est réparti aux extrémités des feuillets.

I.2.2 Classification du GTR

Compte tenu de la diversité des sols, les systèmes de classification ont été développés afin de faciliter la détermination de classes de sol de comportement proche en vue de leur utilisation comme matériaux de construction. Plusieurs classifications existent de part le monde, chacune étant définie en fonction de sa finalité mais aussi des paramètres fondamentaux sur lesquels elle repose. Le GTR (LCPC-SETRA, 2000) propose de classer les matériaux selon leurs paramètres

d'identification et leur état. Ainsi, pour les sols dont le diamètre du plus gros élément (D_{max}) est inférieur à 50 mm, quatre classes de matériaux désignées par les lettres A à D ont été définies (Figure I.5). Au sein de chacune des classes, plusieurs sous catégories sont délimitées en fonction de l'argilosité des matériaux caractérisée soit par l'indice de plasticité (I_p) soit par la valeur d'adsorption du bleu de méthylène (VBS).

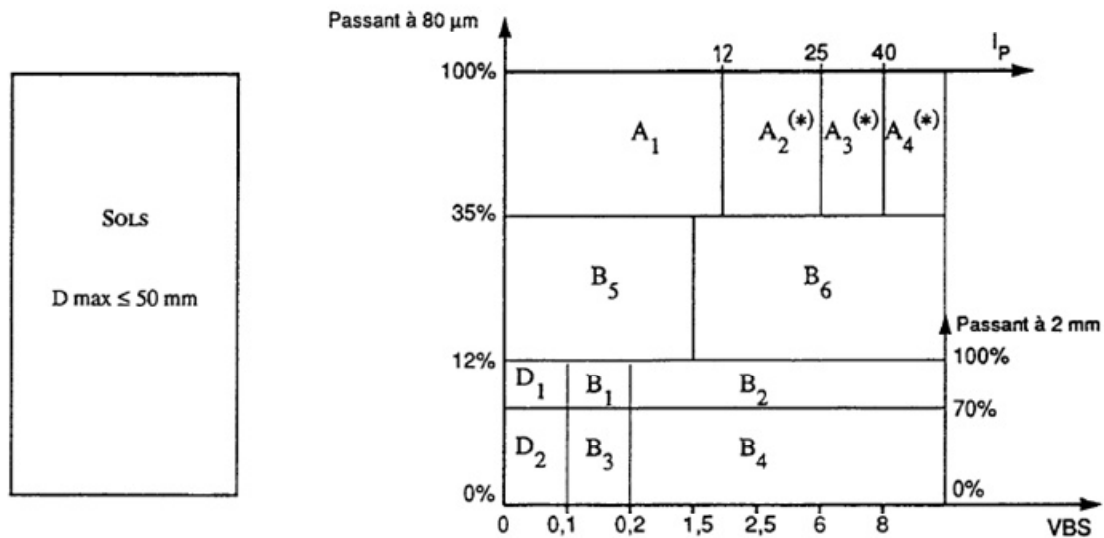


Figure I.5 : Classification des sols de $D_{max} < 50$ mm selon NF P 11-300 (AFNOR, 1992). L'argilosité des sols marqués d'un astérisque (*) est caractérisée par l'indice de plasticité.

Une fois les sols classés selon leurs caractéristiques intrinsèques, la classification GTR définit différentes classes d'humidité des matériaux en se fondant sur la teneur en eau du sol *in situ* par rapport à la teneur en eau optimale de compactage. Ce volet de la classification permet de définir différents états hydriques allant de l'état très sec à l'état très humide. La connaissance de cet état et des conditions climatiques du chantier conditionne la réutilisation des matériaux. Les possibilités et conditions de réutilisation sont décrites dans l'annexe II du GTR.

I.3 Les traitements des sols, problématiques et enjeux

Cette partie présente les principaux objectifs techniques et environnementaux des traitements de sols puis propose une classification des produits traditionnels et non traditionnels en fonction de leur nature. La connaissance de la nature des produits et de leurs principales caractéristiques (dosages, type de sol) permet alors d'effectuer une sélection des catégories de produits non traditionnels les plus prometteuses pour améliorer le bilan environnemental des chantiers de terrassement.

I.3.1 Objectifs des traitements

L'objectif principal d'un traitement de sol est de modifier le comportement des matériaux extraits afin de faciliter leur mise en œuvre et améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Le traitement est motivé par un double intérêt car, en facilitant la valorisation des matériaux disponibles localement, les volumes d'emprunts et les excédents, matériaux alors considérés comme des déchets, sont réduits. Toutefois, malgré les améliorations techniques et environnementales escomptées lorsque le choix du traitement est retenu, il est nécessaire de considérer le problème dans son intégralité. La mise en œuvre d'une technique de traitement de sol nécessite notamment de produire, transporter et de mettre en œuvre les produits. Chacune de ces étapes induit un impact environnemental qu'il est nécessaire d'évaluer pour juger de façon objective de l'intérêt du traitement.

Les produits de traitement étant de natures diverses, ils peuvent engendrer des effets différents sur un même matériau. C'est pour cela qu'une première étape de la démarche entreprise consiste à identifier les différentes techniques de traitement existantes puis à les classer selon leurs origines. Parmi l'ensemble des traitements, il est possible de distinguer les méthodes traditionnelles regroupant les traitements à la chaux et aux liants hydrauliques et les techniques non traditionnelles. La première catégorie de traitement a fait l'objet de développements importants par le passé et est largement répandue. De plus, la production de ces produits nécessite d'utiliser des matières premières non renouvelables et reste très consommatrice d'énergie. A *contrario*, une partie des produits non traditionnels dérivent de la transformation de matières premières renouvelables et sont donc potentiellement intéressants dans une optique de développement durable. Toutefois, afin d'identifier les familles de produits correspondant à cette dernière catégorie, il est nécessaire d'établir une classification fondée sur les matières premières desquelles dérivent les produits de traitement.

I.3.2 Produits traditionnels : chaux et liants hydrauliques

Les produits traditionnels regroupent principalement les chaux et les liants hydrauliques. Peuvent également être intégrés dans cette famille certains sous-produits industriels minéraux tels les laitiers de hauts-fourneaux ou les cendres volantes. Ces dernières substances entrent dans la composition de certains liants hydrauliques ou peuvent être utilisés directement comme produit de traitement du fait de leur aptitude à la prise hydraulique.

- La chaux est fabriquée par décarbonatation du calcaire à une température voisine de 900°C. Cette réaction conduit à la formation d'oxyde de calcium CaO et de dioxyde de carbone CO₂. En terrassement, la chaux est principalement utilisée pour faciliter la mise en œuvre des sols en particulier lorsqu'ils présentent une humidité élevée.

- Les ciments et liants hydrauliques, quant à eux, contiennent une proportion variable de clinker obtenu par calcination à 1450°C d'un mélange de calcaires et d'argiles. En France, ces produits sont désignés par leur classe (CEM I à V) chaque classe correspondant à une gamme de compositions spécifiques définie en fonction de la proportion de clinker, d'adjuvants et de différents sous-produits pouvant y être ajoutés. Les liants hydrauliques sont principalement utilisés lorsqu'un gain de performance mécanique est requis.

I.3.3 Produits non traditionnels

De très nombreux produits non traditionnels sont ou ont été utilisés en traitement de sols. Certains, du fait des faibles quantités disponibles, de leur dangerosité, de leur coût, n'ont fait l'objet que d'études restreintes. Il s'agit notamment des traitements avec des acides minéraux (acide phosphorique, fluorhydrique, fluosilicique, ou sulfurique) dont les utilisations ont été rapportées par Ingles & Metcalf (1970) ou Sokolovich (1973). De même, les substances dispersantes, notamment les sels de phosphates (tetraphosphate, hexametaphosphate, etc.) ont en particulier été étudiées par Lambe (1956) et Peck (1963). Certains sous-produits industriels ont aussi fait l'objet d'études, il s'agit par exemple des mélasses, sous-produits des industries sucrières (Gow *et al.* 1961). Bien qu'elles ne soient plus utilisées directement, elles ont parfois été intégrées dans la formulation de certains produits non traditionnels de la famille des solutions enzymatiques. Des utilisations de résines, telles l'aniline-furfural peuvent également être mentionnées (Sheeler *et al.* 1957). Cependant, leur utilisation a été abandonnée du fait de la toxicité des composés (Wadhawan & Datta, 1965).

D'autres produits de traitement, au contraire, ont été plus largement étudiés et ont fait l'objet d'utilisations *in situ* et de développements au cours des dernières années. Ces produits ont été classés en trois groupes selon leurs origines industrielles. Ces groupes sont les suivants.

- Produits issus de la transformation de matières premières minérales
- Les sels regroupent l'ensemble des composés s'ionisant en solution aqueuse et comprennent notamment les chlorures (chlorure de calcium, de sodium ou encore de magnésium) ou silicates (silicate de sodium). Du fait de leurs propriétés hygroscopiques, les sels sont principalement utilisés comme agents anti poussières (par ex. Maher *et al.* 2005).

- Produits organiques issus de la transformation de matières premières végétales

Bien qu'il soit parfois difficile d'accéder à la composition précise de ces produits dont les fabricants ne divulguent que partiellement la formule, il est possible de faire émerger les catégories suivantes.

- Les solutions acides contenant du limonène sulfonaté sont des solutions aqueuses acides dans lesquels du limonène sous forme sulfonaté est présent (Katz *et al.* 2001 ; Rauch *et al.* 2002). Le limonène dérive du processus d'extraction des jus d'agrumes au cours duquel le jus contenu dans la pulpe est séparé des composés contenus dans l'écorce comme le limonène. Le limonène est par la suite solubilisé par sulfonation dans une solution d'acide sulfurique concentrée.
- Les solutions enzymatiques sont issues des processus de fermentations intervenant lors de l'extraction du sucre à partir de cannes à sucre ou de betteraves.
- Les lignosulfonates dérivent des lignines transformées lors de la fabrication des pâtes à papier. Les lignines sont des polymères végétaux représentant entre 18 et 35 % de la masse sèche d'un arbre (Käärik, 1974 ; Pettersen, 1984). Ces molécules complexes sont séparées des celluloses et rendues solubles dans l'eau par une réaction de sulfonation.
- Les émulsions de résines sont également des sous-produits de l'industrie papetière. Les résines comprennent notamment des acides gras et des acides résiniques. Ces composés sont rendus solubles par ajout d'un émulsifiant.
- Produits issus de la transformation de matières premières pétrolières
- Les émulsions de polymères sont pour l'essentiel composées d'acétates de polyvinyle et d'acides acryliques solubilisés par des émulsifiants. D'autres produits contiennent des composés de type époxy (par ex. Naeini & Ghorbanalizadeh, 2010).
- Les émulsions bitumineuses contiennent l'ensemble des composés pétroliers lourds issus de la distillation des pétroles bruts (isoalcanes, bitumes, polymères aromatiques, etc.). Ces composés sont solubilisés à l'aide d'émulsifiants (Hoover *et al.* 1973).
- Les solutions acides contenant du naphthalène sulfonaté sont de nature similaire à celle contenant du limonène sulfonaté. Cependant, le naphthalène est un sous-produit pétrolier et n'est donc pas renouvelable comme le limonène. À l'instar du limonène, le naphthalène est mélangé à une solution d'acide sulfurique conduisant à sa sulfonation.

Comme les produits non traditionnels sont en partie composés de sous-produits industriels, de nombreuses substances chimiques peuvent cohabiter. Leurs natures

et proportions vont dépendre de la matière première utilisée mais aussi du processus industriel dont ils sont issus. De plus, certaines substances peuvent être ajoutées comme des agents anti-corrosion (sels de magnésium), des surfactants ou encore des agents inhibiteurs d'ultra-violet (Tingle *et al.* 2007). Les formulations précises des produits non traditionnels de traitement des sols ne sont donc généralement pas connues.

I.3.4 Sélection des catégories de produits

Parmi les familles de produits de traitement listées dans la partie précédente, seuls les produits présentant *a priori* les meilleures caractéristiques environnementales feront l'objet d'une étude. La sélection de ces catégories est fondée sur plusieurs critères.

- Le premier critère correspond au caractère renouvelable des matières premières ayant servi à l'élaboration du produit. Tous les produits issus de la transformation de matières premières pétrolières sont de ce fait exclus.
- Le second critère est relatif aux dosages des produits. En effet, plus le dosage est faible, plus les quantités à produire et à transporter sont limitées. En ce sens, les solutions enzymatiques et solutions acides contenant du limonène sulfonaté sont privilégiées du fait des très faibles dosages requis, généralement inférieurs à 0,2 % en masse (Tableau I.1). Au contraire, les lignosulfonates et émulsions de résines nécessitent des dosages de plusieurs pourcents.
- Le troisième critère est d'ordre technique. Certains produits sont plus spécifiquement destinés au traitement des sols granulaires comme les émulsions de résines. Or, les sols fins étant généralement plus problématiques au réemploi, l'intérêt de l'étude porte sur ce dernier type de matériaux. L'utilisation d'émulsions de résine est de ce fait exclue.

En plus des critères techniques, les données issues du guide d'utilisation des produits de traitement pour la construction des chaussées édité par la Federal Highway Administration (Maher *et al.* 2005) donnent un ordre de grandeur du coût de la mise en œuvre des différents traitements aux États-Unis. Les traitements aux solutions acides et au lignosulfonate apparaissent comme étant les moins onéreux. À titre de comparaison (Tableau I.1), les mêmes auteurs estiment les coûts d'un traitement à la chaux aux dosages de 2 à 3 % entre 1,6 et 2,4 \$/m² pour 15 cm d'épaisseur.

Tableau I.1 : Caractéristiques des familles de produits dérivant de la transformation de matières premières renouvelables (Maher *et al.* 2005).

	Solutions acides	Solution enzymatique	Lignosulfonates	Émulsions de résines
Types de sols	Fins	Fins	Fins	Granulaires
Dosages (%)	0,01 – 0,2	0,002 - 0,1	2 – 5	5 – 9
Coûts (\$/m ² /15 cm)	0,4 – 0,8	2,4 – 4,8	0,3 – 0,6	25 - 100

I.4 Traitement avec des produits non traditionnels

L'étude porte sur trois catégories de produits non traditionnels : les produits organiques acides, les solutions enzymatiques et les lignosulfonates. Après un point sur leurs principales utilisations actuelles, un état de l'art des connaissances relatives aux effets des produits sur les caractéristiques géotechniques et le comportement des sols est établi pour chacune des catégories.

I.4.1 Utilisations des produits non traditionnels

Les produits non traditionnels ont des utilisations très diverses. Actuellement, un grand nombre de produits est utilisé pour le traitement des routes non revêtues dans l'objectif de réduire la fréquence et les coûts de maintenance. L'objectif technique alors recherché est d'augmenter la compacité des sols et de limiter la perte de matériaux (par ex. Hoover *et al.* 1973 ; Sanders & Addo, 1993 ; Surdahl *et al.* 2007). Dans ce cas, la mise en œuvre des traitements peut se faire de trois façons :

- par aspersion des produits sur la surface du sol,
- par mélange du produit avec le sol,
- plus rarement par injection (par ex. Sarkar *et al.* 2000).

D'autres applications concernent les sols argileux gonflants riches en sulfates (par ex. Rajendran & Lytton, 1997 ; Harris *et al.* 2006). Ces sols ne peuvent en effet pas être traités avec des produits traditionnels du fait du gonflement induit par la cristallisation de minéraux expansifs.

Les traitements non traditionnels peuvent également répondre à d'autres objectifs comme la réduction des émissions de poussière ou la diminution de la sensibilité à l'érosion des structures traitées. Cette problématique est particulièrement importante aux États-Unis où les routes non revêtues à faible trafic représentent plus de 40 % du réseau routier. De ce fait, la Federal Highway Administration (FHWA) et l'US Department of Agriculture – Forest Service (USDA) ont établi plusieurs rapports et guides concernant ce type de routes :

- pour les émissions de poussières sur routes non revêtues : Bolander & Yamada (1999) et Lunsford & Mahoney (2001),
- pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des chaussées : Maher *et al.* (2005) et Kestler (2009).

Ces documents renseignent les utilisateurs sur les différents types de produits existants, produits non traditionnels compris, leur condition de mise en œuvre ainsi que les effets escomptés. Cependant, ils sont en partie fondés sur les données et recommandations des fournisseurs laissant planer un doute sur l'objectivité des certaines recommandations.

Les traitements non traditionnels sont utilisés dans des applications assez diversifiées. Pour évaluer les intérêts techniques potentiels des produits dans le domaine des terrassements, il est nécessaire de dresser un état de l'art de l'action de ces produits sur les caractéristiques géotechniques des sols, les parties suivantes s'y attèlent.

I.4.2 Traitement de sols avec des produits organiques acides

Les produits organiques acides sont des solutions aqueuses d'acide sulfurique dans lesquelles des molécules de naphthalène ou limonène sulfonaté sont présentes. Certains produits peuvent également contenir des surfactants, des sels et des produits limitant la corrosion des métaux (1,3-diethylurea par exemple). Les études disponibles ne mentionnant pas les noms commerciaux des produits utilisés, des termes tels que « produits ioniques, acides, huiles sulfonatéés, émulsions électrolytiques, etc. » sont employés pour les désigner (Maher *et al.* 2005). Par la suite, les différents termes sont regroupés sous la désignation de « produits acides ».

I.4.2.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques

Les études recensées portent principalement sur les propriétés de compactage, de résistance à la compression simple, de gonflement et de conductivité hydraulique.

a) Caractéristiques de compactage

Une modification des caractéristiques de compactage des matériaux traités avec diverses solutions acides a été rapportée (Rajendran & Lytton, 1997 ; Rauch *et al.* 2003). Rauch *et al.* (2003) mirent en évidence des modifications des références de compactage de sols argileux. Les teneurs en eau à l'optimum de compactage (w_{OPN}) de trois argiles ($I_p = 40 ; 56$ et 64) traitées avec un dosage de 0,17 % ont été modifiées d'au plus 2 points pour des masses volumiques sèches optimales (ρ_{dOPN}) variant de moins de $0,02 \text{ Mg/m}^3$ par rapport aux sols non traités (Tableau I.2). Rajendran & Lytton (1997) ont constaté des modifications d'amplitudes similaires pour l'optimum de compactage.

Cependant, certains auteurs (Tingle & Santoni, 2003 ; Santoni et al. 2002) considèrent au contraire que l'effet sur le compactage n'est pas significatif.

Tableau I.2 : Références de compactage à l'optimum Proctor normal de trois sols traités avec un produit acide (Rauch et al. 2003).

Sol	Non traité		Traité	
	w _{OPN} (%)	ρ _{dOPN} (Mg/m ³)	w _{OPN} (%)	ρ _{dOPN} (Mg/m ³)
Fire clay	19,5	1,63	20,7	1,64
DG Taylor clay	26,0	1,44	28,2	1,44
TG Taylor clay	25,2	1,48	24,0	1,53

b) Résistance à la compression simple

Pour un traitement avec un produit acide, Tingle & Santoni (2003) ont constaté, après 28 jours de cure, des variations maximales de plus ou moins 10 % par rapport à la résistance du sol non traité ($I_p = 13$) pour différents dosages (Figure I.6). Des résultats similaires sont rapportés par Santoni *et al.* (2002) pour une grave sableuse traitée aux dosages de 0,1 et 3 %. Les auteurs ont ainsi conclu à l'absence d'effet du traitement et d'influence du dosage sur la résistance à la compression simple.

Au cours des deux études citées précédemment, les éprouvettes libres sont mises en cure dans une enceinte climatique à 22°C et 40 % d'humidité relative. De ce fait, les éprouvettes sèchent au cours du temps d'où les valeurs de résistance de plusieurs MPa.

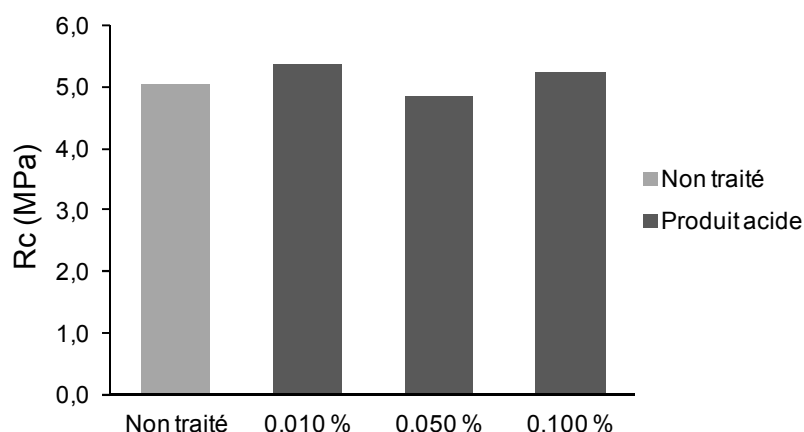


Figure I.6 : Résistance à la compression simple après 28 jours de cure pour un limon traité avec un produit acide à différents dosages (Tingle & Santoni, 2003).

En ce qui concerne la résistance à la compression simple, aucun effet particulier, ni phénomène temporel ne semble se produire. De même, les changements de dosage n'affectent pas les résultats.

c) Potentiel de gonflement

Rauch *et al.* (2002) ont étudié l'influence d'un traitement avec un produit acide contenant du limonène sulfonaté sur le potentiel de gonflement unidimensionnel de deux sols argileux ($I_p = 48$ et 37) et de trois phases argileuses pures : kaolinite, illite et montmorillonite (Figure I.7). Les mesures sont réalisées à l'oedomètre selon la norme ASTM D4546-96 après une cure préalable de sept jours. Pour l'illite, la diminution apparente du gonflement est liée à une plus forte teneur en eau pour les éprouvettes traitées. Pour la kaolinite, une augmentation importante du potentiel de gonflement est observée. Ce phénomène reste toutefois inexpliqué pour les auteurs. Les potentiels de gonflement des deux sols et la montmorillonite n'ont pas été modifiés. Une étude similaire menée par les mêmes auteurs pour un dosage dix fois supérieurs aux recommandations (0,17 %) n'a conduit à aucune modification particulière du potentiel de gonflement unidimensionnel pour trois sols argileux (Rauch *et al.* 2003).

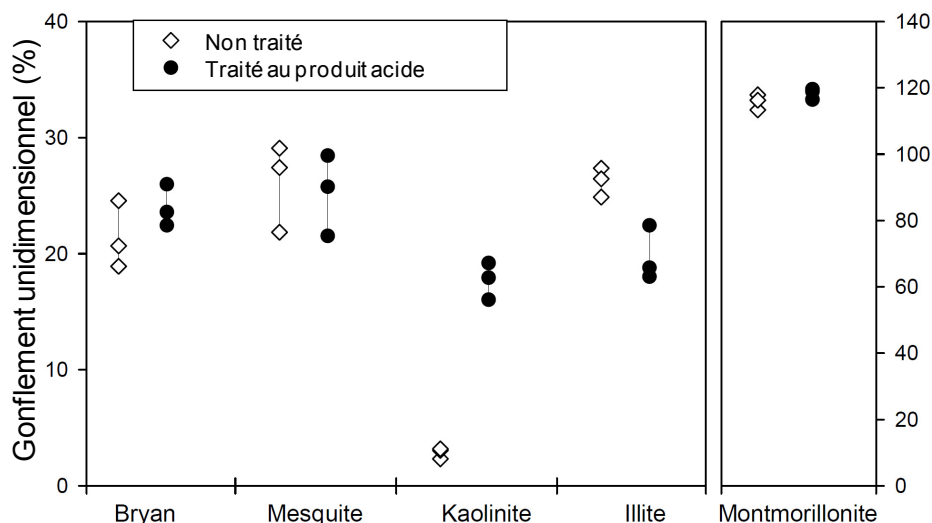


Figure I.7 : Potentiel de gonflement unidimensionnel de cinq sols traités avec une solution contenant du limonène sulfonaté (Rauch *et al.* 2002).

Harris *et al.* (2006) rapportent des réductions de quelques pourcents du potentiel de gonflement d'un sol argileux mélangé à 20 000 ppm de sulfates après traitement avec trois produits acides. En comparaison avec le gonflement volumique observé sur le sol non traité (17 à 23 %), le sol traité présente des potentiels de gonflement pouvant être réduits de 7 %. (Tableau I.3).

Tableau I.3 : Variation du potentiel de gonflement tridimensionnel d'un sol argileux suite au traitement avec trois produits acides (Harris et al. 2006).

Traitement	Dosage (%)	Action sur le potentiel de gonflement
Acide I	0,017 %	- 3 à 4 %
Acide II	0,017 %	+ 1 %
Acide III	0,23 %	- 7 à 8 %

Les résultats obtenus lors de la mesure du potentiel de gonflement des sols sont assez variables y compris au sein d'une même étude. Certains sols présentent des gonflements augmentés, d'autres réduits ou inchangés. Cette variabilité est attribuée par les auteurs à des différences dans les conditions initiales (teneur en eau, densité) des éprouvettes. De plus, un effet de la composition des produits ne peut être exclu comme en témoigne l'étude menée par Harris *et al.* (2006). Cependant, cet aspect doit être relativisé compte tenu des écarts (6 %) observés sur le gonflement du sol non traité.

d) Conductivité hydraulique

Des mesures de conductivité hydraulique effectuées par Rajendran & Lytton (1997), sur deux sols argileux avec des perméamètres à charge constante, ont montré une diminution d'un facteur 2 à 5 des perméabilités des éprouvettes traitées.

I.4.2.2 Effets observés pour une mise en œuvre *in situ*

Parmi les 12 projets de routes forestières rapportés par Scholen (1995), cinq concernaient l'utilisation de produits acides contenant du naphthalène sulfonaté et un l'utilisation de limonène sulfonaté. Les projets routiers consistaient généralement à mélanger des granulats ou du sable apporté avec le substratum silto-argileux en place pour créer une surface susceptible de supporter durablement le trafic. Le mélange était alors traité puis compacté en une couche de 20 à 30 cm d'épaisseur. Scholen rapporte, en 1995, que l'ensemble des sections traitées n'avaient pas nécessité d'entretien depuis leur construction entre septembre 1991 et juillet 1993.

Une évaluation *in situ* menée par Visser (2007), comprenait l'étude d'un produit acide contenant des molécules organiques sulfonaté. Parmi les quatre sols testés entre novembre 2004 et août 2005, une amélioration des indices CBR a été observée par rapport aux sections non traitées (Tableau I.4). Il est à noter que les valeurs maximales sont atteintes au mois d'août à la fin de l'expérience alors que les conditions climatiques étaient les plus sèches.

Tableau I.4 : Indices CBR *in situ* obtenus après traitement avec un produit non traditionnel acide.

Sol	Valeur maximale de CBR	
	Non traité	Traité
Ferricrete (fines : 72 %)	73	131
Sable éolien (fines : 83%)	134	245
Dolérite altérée ($I_p = 11$ %)	220	245
Grave (fines : 71 % ; $I_p = 12$ %)	85	199

Tingle & Santoni (2003) mentionnent également l'utilisation de deux produits acides par Scullion (2002) lors de la construction de deux routes au Texas. Des tests *in situ* ont été menés afin d'évaluer les performances des produits pour la stabilisation d'un sol argileux gonflant. Les essais au pénétromètre dynamique et les mesures de déflexion n'ont montré aucune amélioration de la capacité portante ni de la raideur du sol.

De manière générale, les retours d'expérience sur les essais *in situ* sont restreints et se limitent à des descriptions qualitatives. Toutefois, certaines améliorations du comportement mécanique ont été rapportées sans qu'il soit possible de déterminer leur caractère significatif.

1.4.2.3 Mode d'action sur les sols

Définir le mode d'action des produits non traditionnels acides nécessite de prendre en compte l'ensemble des effets mécaniques macroscopiques rapporté et de les compléter par les résultats des essais visant à caractériser l'impact des traitements sur les minéraux argileux et la microstructure des sols. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'action des traitements au niveau microscopique et ont tenté de proposer un mécanisme d'action fondé sur leurs observations.

a) Données expérimentales

Katz *et al.* (2001), Rauch *et al.* (2003), Tingle *et al.* (2007) ont employé différentes techniques pour caractériser les effets des produits sur la microstructure du sol et ses minéraux argileux (diffraction des rayons X, microscopie électronique à balayage, mesures de surfaces spécifiques). Dans une étude menée par Rauch *et al.* (2003), des mesures de surface spécifique par adsorption de diazote (méthode BET) ont été réalisées sur trois argiles (kaolinite, illite et montmorillonite) et de deux sols naturels argileux traités avec une solution acide contenant du limonène sulfonaté. Les résultats obtenus montrent, qu'à l'exception de la kaolinite et de l'illite, les surfaces spécifiques mesurées ont été réduites par l'apport du traitement témoignant du passage des minéraux argileux d'un état dispersé à un état agrégé. Cette hypothèse a été confirmée par des observations au microscope électronique à balayage montrant un état d'agrégation plus important après traitement. Les mêmes

auteurs notent également que la capacité d'échange cationique de la montmorillonite traitée à des dosages de 0,017 ; 0,1 et 33 % reste inchangé et indiquerait donc que la nature des phases minérales n'a pas été modifiée. Cette hypothèse est confirmée par les essais de diffraction des rayons X menés par Katz *et al.* (2001) et Rauch *et al.* (2003) sur différentes argiles (montmorillonite, illite, kaolinite) à des dosages pouvant atteindre 50 %. Les données acquises ont alors montré que la nature des minéraux argileux n'était pas affectée par le traitement.

L'étude des indices de consistance des sols apporte également des informations sur leurs caractéristiques intrinsèques. Parmi les études disponibles (Rauch *et al.* 2002 ; Rauch *et al.* 2003 ; Wrigth 1993, cité par Scholen 1995), seuls Rauch *et al.* (2002) rapportent une réduction significative de la plasticité d'un sol argileux ($I_P = 37$) traité avec un produit acide. Les autres auteurs considèrent les modifications comme non significatives.

b) Mécanismes d'action suggérés

Pour expliquer l'action des produits non traditionnels acides, Scholen (1995) évoque le retrait définitif des cations échangeables des espaces interfoliaires des argiles par chélation avec les molécules organiques ionisées contenues dans les produits non traditionnels acides. Cette action conduirait à flocculer les minéraux argileux et à réduire leur couronne d'hydratation.

Au-delà, les effets d'une modification du pH et de la composition ionique du fluide interstitiel ont été étudiés par ailleurs (Di Maio *et al.* 2004, Palomino & Santamarina, 2005 ; Dong & Wang, 2008). Ainsi, Palomino & Santamarina (2005) ont montré que, pour des concentrations ioniques faibles ($\text{NaCl} < 1.10^{-2} \text{ mol/L}$) et un pH basique, les minéraux de kaolinite présentaient un état dispersé. Une réduction du pH induit alors une floculation. Dans les mêmes conditions ioniques, lorsque le pH est inférieur à 5, un phénomène d'agrégation est observé.

En cas de réduction importante du pH, une dissolution des minéraux argileux se produit comme indiqué par Ingles & Metcalf (1973) ou Yeoh & Oades, (1981). Par exemple, en dessous d'un pH 2, la kaolinite se dissout (Palomino & Santamarina, 2005 ; Wieland & Stumm, 1992).

c) Discussion

Les résultats des études indiquent de façon cohérente, qu'il n'y a pas eu de modification de la nature minéralogique des minéraux argileux suite au traitement. Seul l'état d'agrégation aurait été changé. L'hypothèse la plus vraisemblable pouvant expliquer ces modifications fait intervenir un changement de la composition ionique du fluide interstitiel. Toutefois, il est difficile d'établir un lien entre ces effets et les changements du comportement macroscopique des sols traités.

I.4.2.4 Apport des traitements acides

L'action des produits non traditionnels acides sur les caractéristiques hydromécaniques des sols est variée voire dans certains cas, peut conduire à des observations contradictoires. C'est notamment le cas pour les résultats des essais de compactage et de gonflement. Toutefois, l'ampleur des modifications rapportées est fréquemment limitée par rapport aux caractéristiques des sols non traités. Il est de ce fait généralement difficile de distinguer les effets du traitement à proprement parler des effets liés aux paramètres expérimentaux (densité, teneur en eau initiale, biais expérimentaux divers). Ce point nécessite d'être précisé. De plus, très peu d'informations sont disponibles sur la nature des produits utilisés ce qui empêche d'établir un lien entre leur composition chimique et les effets mécaniques engendrés. Les données concernant l'interprétation des effets du traitement sur l'impact environnemental des chantiers ne sont, dans aucun cas, abordés.

I.4.3 Traitement de sols avec des produits enzymatiques

Les produits enzymatiques sont des solutions aqueuses en partie issues des processus de fermentations intervenant lors de l'extraction du sucre. Elles contiennent ainsi un ensemble de substances telles des saccharides, des composés azotés, des sels, mais aussi des protéines héritées des végétaux saccharifères. Une teneur en protéine de 9,2 g/L a par exemple été mesurée par Velasquez *et al.* (2006). Au sein de la famille des protéines, les enzymes ont la particularité de posséder une fonction catalytique.

I.4.3.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques

a) Caractéristiques de compactage

Des modifications des propriétés de compactage des sols, induites par le traitement avec une solution enzymatique, ont été rapportées par Rajendran & Lytton (1997) et Rauch *et al.* (2003). L'effet du traitement porte essentiellement sur la teneur en eau optimale alors que la masse volumique sèche maximale n'est que faiblement affectée (Tableau I.5). Velasquez *et al.* (2006) ont, quant à eux, rapporté que les éprouvettes traitées se compactaient plus facilement sans toutefois quantifier le phénomène. Par ailleurs, selon Tingle & Santoni (2003), les traitements enzymatiques utilisés n'auraient pas eu d'effet significatif sur les propriétés de compactage des sols testés.

Tableau I.5 : Références de compactage à l'optimum Proctor normal de trois argiles plastiques traitées avec une solution enzymatique (Rauch et al. 2003).

Sol	Non traité		Traité	
	W _{OPN} (%)	ρ _{dOPN} (Mg/m ³)	W _{OPN} (%)	ρ _{dOPN} (Mg/m ³)
Fire clay	19,5	1,63	21,2	1,64
DG Taylor clay	26,0	1,44	29,0	1,42
TG Taylor clay	25,2	1,48	25,3	1,48

Les études montrent que les essais de compactage présentent des résultats variables d'un sol à un autre. Les teneurs en eau optimales peuvent évoluer de quelques pourcents et les masses volumiques sèches de quelques centièmes de Mg/m³ sans présenter de tendance particulière. L'essentiel des essais portent toutefois sur des sols très plastiques, il est de ce fait nécessaire de compléter les données pour des sols de faible indice de plasticité.

b) Résistance à la compression simple

Tingle & Santoni (2003) ont testé trois dosages différents pour quatre produits enzymatiques soumis à des conditions de cure laissant les éprouvettes sécher en chambre climatique à 22°C pour 40 % d'humidité relative (Figure I.8).

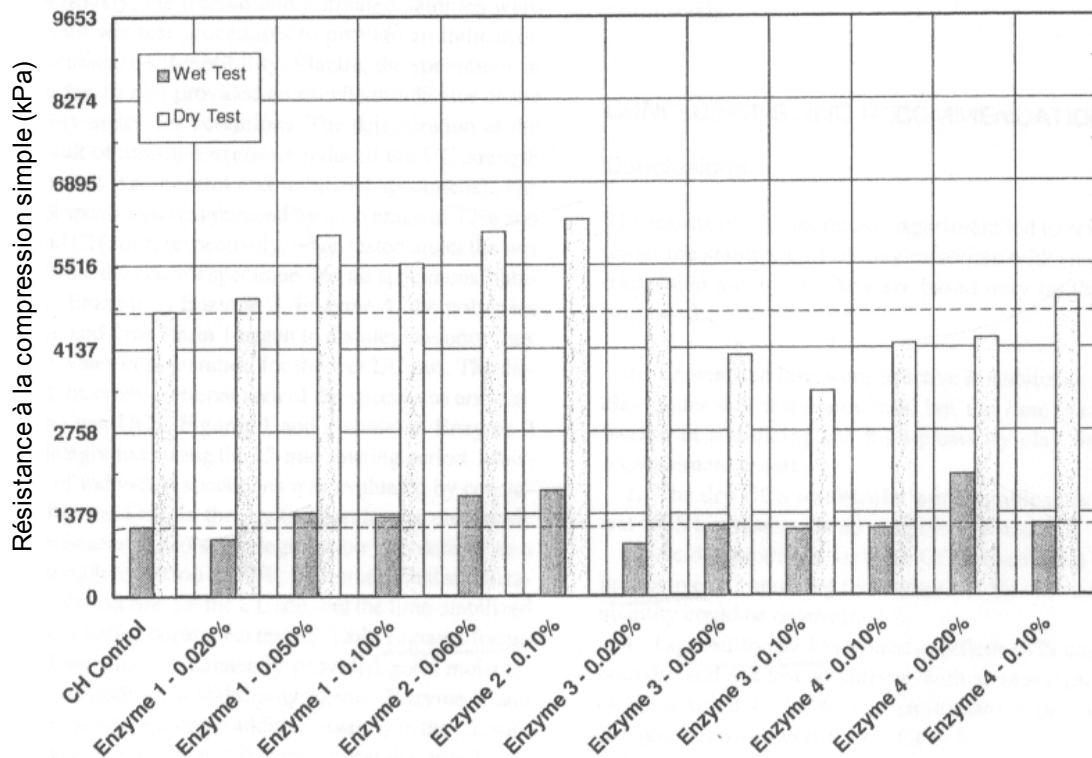


Figure I.8 : Résistance à la compression simple pour un sol argileux traité avec quatre solutions enzymatiques différentes (Tingle & Santoni, 2003).

Après 28 jours de cure les résultats montrent que :

- pour le limon ($I_P = 13$), les résistances varient de $\pm 10\%$ par rapport au sol non traité,
- pour le sol argileux ($I_P = 51$), les variations maximales observées sont de $\pm 30\%$ par rapport au sol non traité (Figure I.8).

D'autres études relèvent des améliorations plus conséquentes : 70 % d'une grave argilo-sableuse (Santoni *et al.* 2002) ; 20 à 80 % pour deux sols fins non plastiques et un limon (Parson & Milburn, 2003). Cependant, dans tous les cas, les éprouvettes traitées mises en immersion dans l'eau après plusieurs jours de cure se désagrègent toutes en quelques minutes (Parson & Milburn, 2003 ; Tingle & Santoni, 2003).

Finalement, l'ensemble des résultats montre que quelle que soit la nature du sol, la nature de la solution enzymatique, le temps de cure, le mode de cure ou le dosage employé, les valeurs de résistance à la compression simple varient de moins d'un facteur deux par rapport aux éprouvettes non traitées. Les auteurs n'apportent pas d'explication particulière quant à l'origine des variations observées.

c) Potentiel de gonflement

Rauch *et al.* (2002) rapportent des réductions maximales de 5 à 10 % du potentiel de gonflement de cinq sols argileux traités (Figure I.9). Les plus fortes réductions sont toutefois attribuées par les auteurs aux teneurs en eau plus élevées des éprouvettes traitées. Harris *et al.* (2006) ont montré que, dès lors que les teneurs en eau initiales des éprouvettes traitées étaient les mêmes, les potentiels de gonflement étaient identiques.

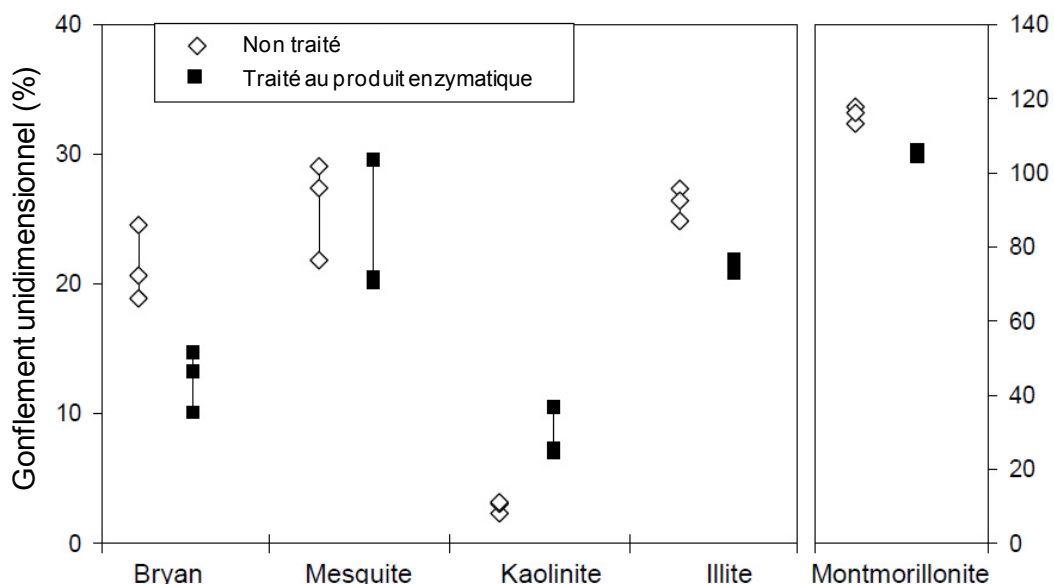


Figure I.9 : Potentiel de gonflement unidimensionnel de cinq sols traités avec une solution enzymatique (Rauch *et al.* 2002).

I.4.3.2 Effets observés pour une mise en œuvre *in situ*

Malgré des études en laboratoire en nombre limité, les traitements enzymatiques ont fait l'objet de nombreuses utilisations en vraie grandeur. Velasquez *et al.* (2005) relaient une liste de 34 projets communiquée par le fournisseur de produits de traitement. Scholen (1995) cite également trois projets de routes non revêtues aux États-Unis ayant fait l'objet d'un suivi. Seuls quelques éléments qualitatifs sur les utilisations sont disponibles.

En 1989, au Lewis and Clark National Forest, Montana, un granulat gréseux a été mélangé à une argile puis traité avec une solution enzymatique. Cette section aurait montré de meilleures performances et subi une érosion moindre par rapport à la section non traitée (Scholen, 1995). Un constat similaire est effectué en 1992 pour un sol argilo-sableux traité en septembre 1991 (Ouachita National Forest, Oklahoma). Après plusieurs passages de grumiers, la section traitée ne présentait pas d'ornières contrairement à une route adjacente fortement dégradée. Dans les mêmes circonstances, le traitement enzymatique d'une argile gonflante n'a pas conféré à la piste une meilleure durabilité au trafic. La pluie intense, survenue après mise en œuvre du traitement, pourrait être à l'origine de cet échec (Scholen, 1995).

Visser (2007) rapporte des améliorations de portance pour les sections traitées dans un cas sur deux. Pour l'autre moitié des cas, la portance a été réduite, parfois de moitié par rapport aux sections non traitées. Il est également rapporté que des différences de trafic et d'exposition des sections traitées peuvent induire des écarts sur les propriétés mécaniques mesurées.

À l'instar des essais en laboratoire, les données *in situ* témoignent d'une grande variabilité d'action des traitements. Tantôt les caractéristiques sont améliorées, tantôt dégradées ou inchangées. Les conditions expérimentales *in situ* étant très variables (trafic, météo, exposition, etc.) et non enregistrées au cours du temps, il n'est pas possible de conclure quant à un effet particulier d'un traitement.

I.4.3.3 Mode d'action sur les sols

Peu d'auteurs se sont directement intéressés aux mécanismes d'action des traitements enzymatiques. Le recueil des données expérimentales, couplé à l'étude de l'effet des traitements sur la microstructure des sols traités, apporte toutefois des informations permettant d'ouvrir une réflexion sur les mécanismes d'action des traitements.

a) Données expérimentales

Rauch *et al.* (2003) ont cherché à approfondir l'étude du mode d'action des solutions enzymatiques. Ils ont notamment montré une réduction de plus de 80 % des surfaces spécifiques de trois argiles (kaolinite, illite et montmorillonite) et de deux sols naturels argileux traités avec une solution enzymatique au dosage de 0,002 %. Seule la kaolinite semblait ne pas être affectée. Par ailleurs, la capacité d'échange

cationique des sols n'a pas été modifiée et les analyses par diffraction des rayons X n'a montré aucune modification significative des espacements interfoliaires ni de changement de minéralogie. Seul un dosage extrême de 50 % arrive à modifier la distance interfoliaire de la montmorillonite en l'augmentant de 12 à 17 Å. Compte tenu des résultats obtenus, les auteurs (Rauch *et al.* 2003) expliquent la réduction de la surface spécifique observée par l'agrégation des minéraux argileux, phénomène confirmé selon les auteurs par des observations au microscope électronique à balayage.

Quelques études s'accordent également sur l'absence de modification des indices de plasticité des sols traités (Rauch *et al.* 2002, 2003 ; Wrigth, 1993 cité par Scholen, 1995).

b) Mécanismes d'action suggérés

Les mécanismes d'action rapportés par Scholen (1992, 1995) font intervenir les propriétés catalytiques des enzymes. Leur action permettrait de catalyser des réactions de cimentation des grains du sol et favoriserait la formation de liaisons entre la surface des minéraux argileux chargée négativement et les molécules organiques chargées positivement. En se fixant autour des minéraux argileux, les molécules organiques neutraliseraient la charge négative des argiles et occuperaient les sites d'échange ionique ce qui diminuerait leur aptitude à absorber l'eau et donc à gonfler. Cependant, ce mécanisme s'oppose aux résultats expérimentaux obtenus lors d'essais de gonflement (par ex. Harris *et al.* 2006 ; Rauch *et al.* 2002).

Le mode d'action faisant intervenir des réactions enzymatiques est également remis en cause par Velasquez *et al.* (2006). En effet, leurs études ont montré que les produits enzymatiques utilisés ne présentaient aucune activité enzymatique. Les auteurs mirent par ailleurs en évidence que certains produits enzymatiques procédaient des propriétés tensioactives. D'après eux, cette caractéristique faciliterait le compactage des matériaux traités en réduisant la succion du sol traité.

I.4.3.4 Apport des traitements enzymatiques

L'étude de l'impact du traitement de sols avec des produits enzymatiques fait ressortir une action variée sur les propriétés mécaniques aussi bien en laboratoire qu'en vraie grandeur. Il est de ce fait essentiel d'identifier les causes de ces variabilités. Seraient-elles à mettre en lien avec la nature des sols, avec celle des produits, ou des conditions d'application ? De plus, il est supposé qu'une partie des variations observées est causée par des différences d'états initiaux des éprouvettes. Une attention particulière doit être portée sur ce point afin de conclure à un éventuel effet du traitement.

I.4.4 Traitement de sols avec des lignosulfonates

Les lignosulfonates sont utilisés par diverses industries notamment comme plastifiants pour béton (Nachtergal, 1988), dispersants pour boues de forage (Sjöström, 1993) ou encore comme liants dans l'industrie agroalimentaire (JECFA, 2008). Dans le domaine de la construction routière, les lignosulfonates sont essentiellement employés pour réduire les émissions de poussières générées par le trafic sur routes non revêtues (Hoover *et al.* 1973 ; Surdahl *et al.* 2007).

La structure de base des lignosulfonates est constituée d'un cycle aromatique lié à une chaîne de trois atomes de carbone (Figure I.10). La structure est polymérisée par des liaisons carbone-oxygène-carbone ou carbone-carbone entre cycles aromatiques. Les fonctions alcool ($-OH$), acides carboxyliques ($-COOH$) et sulfonates ($-SO_3^-$) sont également abondantes dans la structure du polymère. L'électroneutralité est assurée par des cations dont la nature dépend du processus industriel : calcium, sodium, magnésium et ammonium pour les plus fréquents. Les lignosulfonates sont commercialisés en solutions ou sous forme de poudres. Leur degré de pureté et composition sont variables en fonction de la nature de la matière première (essences d'arbres) et des processus industriels permettant de les extraire. Les lignosulfonates de calcium sont par exemple produits par l'ajout de bisulfite de calcium.

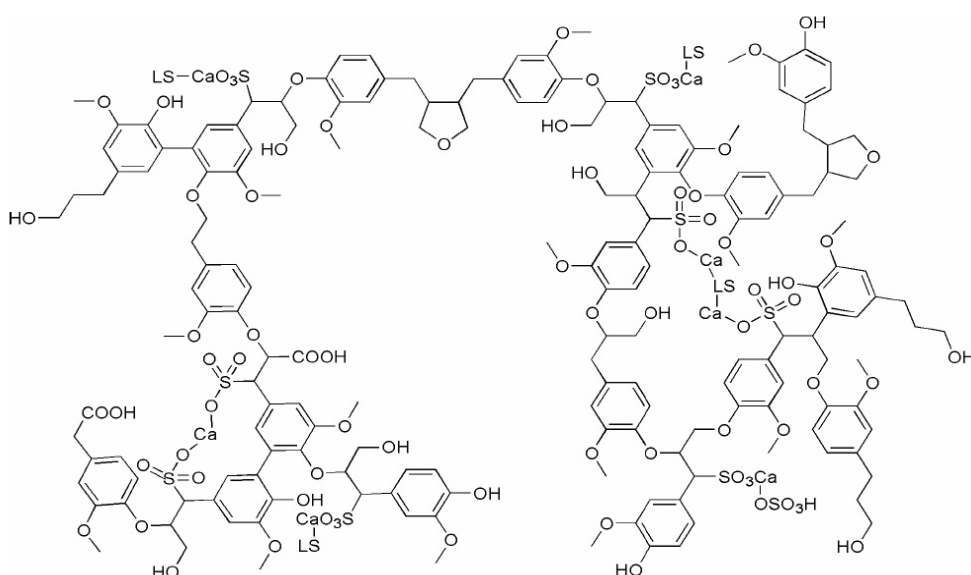


Figure I.10 : Formule topologique d'un lignosulfonate de calcium, (69th JECFA : Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2008).

I.4.4.1 Effets sur les propriétés hydromécaniques

a) Caractéristiques de compactage

Plusieurs auteurs rapportent une augmentation de la masse volumique sèche maximale après traitement avec des lignosulfonates (Gow *et al.* 1961 ; Palmer *et al.* 1995 ; Bolander & Yamana, 1999). Par exemple, Gow *et al.* (1961) mentionnent une

augmentation de $0,07 \text{ Mg/m}^3$ accompagnée d'une réduction de 1,5 % de la teneur en eau optimale pour une grave argilo-sableuse traitée avec deux solutions différentes de lignosulfonates (Figure I.11). Pour les deux produits, les effets maximaux sont atteints pour des dosages compris entre 0,5 et 1,5 %.

Cependant, d'autres auteurs n'ont pas mis en évidence d'impact significatif sur les caractéristiques de compactage (Tingle & Santoni, 2003 ; Petry & Jiang, 2007).

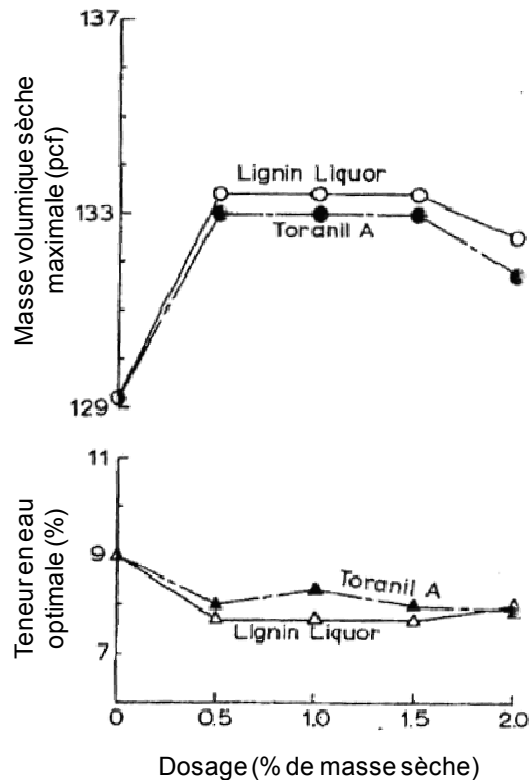


Figure I.11 : Influence du dosage sur la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale pour deux solutions de lignosulfonates (Gow *et al.* 1961), $1 \text{ pcf} = 1,6 \text{ Mg/m}^3$.

Les indices CBR mesurés par Gow *et al.* immédiatement après compactage pour les deux traitements montrent une amélioration d'un facteur 4 à 5 de la portance suite à l'apport de 0,5 % (masse sèche / masse de sol sec). Lorsque le dosage augmente, une tendance à la réduction de la portance est constatée (Tableau I.6).

Tableau I.6 : Influence du traitement sur l'indice CBR à l'optimum de compactage pour différents dosages avec deux solutions de lignosulfonates (Gow et al. 1961).

Dosage (% de matière sèche)	Indice CBR immédiat	
	Lignin liquor	Toranil A
0,0	15	
0,5	71	64
1,0	53	39
1,5	47	42
2,0	16	27

b) Résistance à la compression simple

Tingle & Santoni (2003) ont montré des augmentations de 20 à 50 % des valeurs de résistance à la compression simple d'un limon traité à différents dosages en lignosulfonates (Figure I.12). Les résistances maximales sont atteintes pour un dosage massique de 5 %. Une même valeur optimale est rapportée par Santoni *et al.* (2002) pour une grave argilo-sableuse. Lors de cette étude, les éprouvettes ont été placées dans une enceinte climatique à 22°C et 40 % d'humidité relative afin de reproduire des conditions climatiques arides.

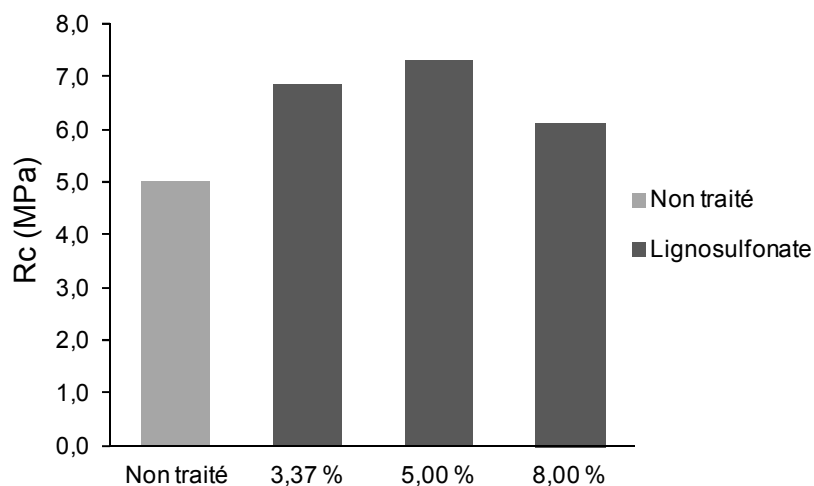


Figure I.12 : Résistance à la compression simple après 28 jours de cure pour un limon traité avec un lignosulfonate de calcium à différents dosages (Tingle & Santoni, 2003).

Pour une cure à teneur en eau constante, Geiman (2005) rapporte des améliorations de l'ordre de 20 % pour deux limons. Quant au sable, aucune modification n'est observée. L'auteur note également l'absence de phénomène de prise au cours du temps.

c) Potentiel de gonflement

Les études rapportent des réductions de quelques pourcents du potentiel de gonflement des plastiques traités avec des lignosulfonates (Harris *et al.* 2006 ; Petry & Jiang, 2007).

I.4.4.2 Effets observés pour une mise en œuvre in situ

Malgré le fait que les lignosulfonates soient fréquemment employés pour réduire les émissions de poussières sur routes non revêtues en zone arides, très peu de données sont disponibles sur leurs performances mécaniques *in situ*. Seules quelques mentions qualitatives sont rapportées : Surdahl *et al.* (2007) rapportent ainsi une amélioration de la raideur d'un sol granulaire traité avec un lignosulfonate.

Certaines études rapportent de bonnes performances en termes de réduction des émissions de poussières (Surdahl *et al.* 2007 ; Addo *et al.* 2004). Addo *et al.* (2004) indiquent par exemple une réduction d'un facteur 2 à 10 des quantités de poussières émises au cours de l'année suivant l'application du traitement. Toutefois, cet effet est particulièrement sensible aux cycles de séchage-humidification. En effet, les écoulements d'eau peuvent entraîner un lessivage progressif du produit et une perte associée de performance, nécessitant un renouvellement de l'application du traitement comme indiqué par Hoover *et al.* (1973) et Sanders & Addo (1993). De ce fait, de meilleures performances et une durabilité plus importante des traitements sont observée dans les régions les plus arides.

I.4.4.3 Mécanisme d'action

Le mode d'action des lignosulfonates est utilisé dans différents processus industriels. Leur action dispersante permet de fluidifier les boues de forages ou les bétons et leurs propriétés liantes trouvent des applications dans la fabrication de briques ou de granules alimentaires. Afin d'expliquer l'action des lignosulfonates sur les sols et de caractériser l'évolution du comportement des sols traités à long terme, certaines études se sont intéressées à l'action du traitement sur les minéraux argileux des sols et leur microstructure. Les résultats sont synthétisés dans la partie suivante et servent de base à la critique des mécanismes d'action proposés.

a) Données expérimentales

L'ajout de lignosulfonates au sol modifie ses limites d'Atterberg comme montré par différents auteurs (Lambe, 1956 ; Gow *et al.* 1961 ; Petry & Jiang 2007). Toutefois, les effets sont contrastés (Tableau I.7) et aucune tendance ne se dessine. Cependant, les modifications observées sur les limites de liquidité ou de plasticité restent inférieures à 5 % de teneur en eau. L'action des lignosulfonates sur les indices de plasticité dépend également du dosage (Lambe, 1956 et Gow *et al.* 1961), plus la quantité de lignosulfonates est élevée, plus les modifications des limites sont marquées.

Tableau I.7 : Effets de traitements au lignosulfonate sur les indices de plasticité des sols : (+), augmentation, (-) réduction et (=), absence de modification de la caractéristique.

Étude	Produit	I _p du sol non traité	Action sur les indices		
			w _p	w _L	I _p
Lambe (1956)	Lignosulfonate de calcium	24	ND	-	ND
Gow <i>et al.</i> (1961)	Lignosulfonate de calcium A	8,7	-	+	+
	Lignosulfonate de calcium B		-	+	+
Petry & Jiang (2007)	Lignosulfonate d'ammonium + KOH	18	=	-	-
		50	+	=	-

ND : non déterminé

Vinod *et al.* (2010) rapportent une réduction de la taille moyenne des particules argileuses déterminées à partir des courbes de diffraction des rayons X. Les réductions les plus importantes sont observées pour les montmorillonites et illites avec respectivement - 72 % et - 49 %. Cette observation est interprétée par les auteurs comme résultant d'une réduction de la double couche des minéraux argileux due à la neutralisation des charges négatives en surfaces des argiles par les charges positives des lignosulfonates. Les résultats obtenus par diffraction des rayons X indiquent également qu'il n'y a pas de formation de nouvelles phases minérales (Vinod *et al.* 2010).

La formation de liens entre les grains du sol après ajout de lignosulfonates dans un sol sableux non plastique a également été observée au MEB (Indraratna *et al.* 2008). Elle est mise en avant par les auteurs de l'étude comme étant à l'origine de la réduction du caractère érodable du sol. Cependant, aucune analyse de la nature de ces liens n'est effectuée.

b) Mécanismes d'action suggérés

Selon Lambe (1956) les lignosulfonates grâce à leurs propriétés dispersantes agiraient en augmentant les forces de répulsion entre particules amenant le sol dans un état dispersé. La disparition des agrégats et l'orientation des particules argileuses bord à bord conduiraient à une diminution du volume des vides au sein du sol. Lors du compactage, une densité sèche supérieure et une perméabilité réduite pourraient ainsi être atteintes.

Par ailleurs, la structure complexe des lignines et l'abondance de fonctions polaires donneraient aux lignines la capacité de lier les grains du sol en formant un gel à l'image d'une colle (Ingles & Metcalf, 1970). Un mécanisme similaire de formation d'un « film adhésif » entre les particules du sol est évoqué par Tingle *et al.* (2007).

Des études par spectrométrie infrarouge obtenues par Vinod *et al.* (2010) sur un sol argileux ($I_p = 18$) additionné de 0,6 % de lignosulfonate de calcium suggèrent également que ces molécules ont la capacité de se fixer sur les minéraux argileux.

Tingle *et al.* (2004) supposent aussi que le produit pourrait agir comme un tensioactif ionique. En effet, les lignosulfonates sont également connus pour leurs propriétés tensioactives (Hoffman *et al.* 1968, Askvik, 1999, Trufanova, 2010). En lubrifiant les grains du sol, le compactage serait facilité.

c) Discussion

L'ajout de lignosulfonate au sol a pour effet de modifier les relations entre les minéraux argileux ce qui se traduit notamment par une modification des caractéristiques d'identification des sols traités.

L'une des principales difficultés d'interprétation est la diversité des propriétés des molécules de lignosulfonate. En effet, les lignosulfonates peuvent aussi bien avoir des propriétés dispersantes que liantes en fonction du milieu et de leur état d'hydratation. Ces molécules sont également connues pour leurs propriétés tensioactives. Par ailleurs, les molécules peuvent varier de charge en fonction du pH ou encore échanger des ions en fonction des conditions du milieu ce qui rend l'identification d'un mode d'action plus complexe.

1.4.4.4 Apport des traitements aux lignosulfonates

Les résultats des essais mécaniques rapportés dans la littérature montrent que les traitements aux lignosulfonates modifient les caractéristiques de compactage, de portance et de la résistance à la compression simple des sols traités. L'ensemble de ces modifications est sensible au dosage employé. Il est de ce fait nécessaire de prendre cet aspect en compte pour juger des performances du traitement.

De plus, les améliorations de résistance à la compression simple les plus importantes sont observées en cas de séchage du sol. Le mode de cure est donc susceptible d'influencer les résultats. Sachant par ailleurs que les lignosulfonates sont réputés biodégradables et facilement lessivables, la pérennité de ces améliorations devrait être évaluée.

1.4.5 Implications techniques et environnementales des traitements non traditionnels

Les parties précédentes ont permis d'établir un état de l'art sur l'action des trois catégories de produits retenues : les solutions acides, les solutions enzymatiques et les lignosulfonates. Les effets des traitements sur les propriétés hydromécaniques ont été détaillés et les mécanismes d'action renseignés et discutés. Chaque traitement modifie différemment le comportement des sols. Il en ressort que les

applications des traitements dans le domaine des terrassements doivent être définies de façon spécifique.

Les résultats expérimentaux montrent que chacun des produits présente un intérêt potentiel mais que ceux-ci sont systématiquement observés dans des contextes particuliers. Pour les traitements acides par exemple, des améliorations de portance sont rapportées dans une étude lors de la mise en œuvre *in situ*. Les traitements enzymatiques peuvent, par exemple, conduire à des améliorations de la résistance à la compression simple des sols et à des augmentations de densité. Enfin, l'apport de lignosulfonates induit également des augmentations des résistances à la compression simple et des améliorations de la portance. Cependant, l'ensemble de ces résultats est obtenu pour des associations précises entre produits, sols, dosages, conditions de mise en œuvre et mode de cure. Ainsi, les résultats sont difficilement généralisables. Dans ce contexte, l'objectif est d'apporter des données factuelles quant aux effets des traitements et de tester leur sensibilité face à différents paramètres. Seront notamment étudiés les effets du temps de cure, essentiel pour juger de la durabilité du traitement, et les effets du dosage, qui conditionne directement l'impact environnemental et le coût associé à l'utilisation du produit.

En plus des aspects techniques, les problématiques environnementales sont très peu abordées dans les études recensées. Même si les produits sélectionnés ont l'avantage de dériver de matières premières renouvelables, faire le choix d'un traitement implique des impacts spécifiques qui doivent être quantifiés. De plus, l'ensemble des phases du cycle de vie du produit doit être pris en compte pour évaluer l'impact du traitement de la manière la plus complète. La partie suivante vise ainsi à faire un point sur les études prenant en compte les aspects techniques et environnementaux dans le domaine du génie civil et plus particulièrement dans le secteur des terrassements. L'objectif est également de donner des exemples de réalisation de telles études et de détailler l'outil utilisé : la méthode d'analyse en cycle de vie.

I.5 Méthodologies d'évaluation environnementale

Afin d'évaluer de façon objective l'apport des traitements sur le bilan environnemental, des évaluations globales doivent être entreprises. Cette partie s'intéresse dans un premier temps au principe de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) puis détaille son application aux matériaux de construction selon la norme NF P 01-010 (AFNOR, 2004). Une fois les méthodologies exposées, un état des lieux de l'utilisation des méthodes d'évaluation environnementale dans le domaine de la construction est proposé.

I.5.1 Définition et principe de l'analyse du cycle de vie selon ISO 14040

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation environnementale multicritère ayant pour objectif de quantifier l'ensemble des impacts environnementaux potentiels d'un système au cours des différentes phases de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son élimination finale. La démarche suivie est régie au niveau international par les normes ISO 14040 (AFNOR 2006a) et ISO 14044 (AFNOR 2006b) actuellement en vigueur. Ces normes remplacent les quatre normes ISO parues entre 1997 et 2000 (NF EN ISO 14040 à 14043) et ont valeur de normes françaises.

I.5.1.1 Objectif et champ de l'étude

Réaliser une analyse du cycle de vie d'un système (bien ou service) revient à effectuer un bilan des flux entrants (matières premières, énergies, etc.) et des flux sortants (émissions dans l'air, l'eau et le sol) du système pour chacune des phases de son cycle de vie. Une fois le bilan effectué, les impacts potentiels du système sur l'environnement sont évalués.

Selon la norme NF EN ISO 14040, la démarche d'une ACV comprend quatre phases (Figure I.13) :

- la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude,
- la phase d'inventaire,
- la phase d'évaluation de l'impact,
- la phase d'interprétation.

La réalisation d'une ACV est une démarche itérative pouvant nécessiter des modifications successives à différents stades de l'étude afin de répondre aux objectifs fixés. Ainsi, le champ d'étude et les frontières du système peuvent être redéfinies et affinées au fur et à mesure de l'avancée de l'analyse.

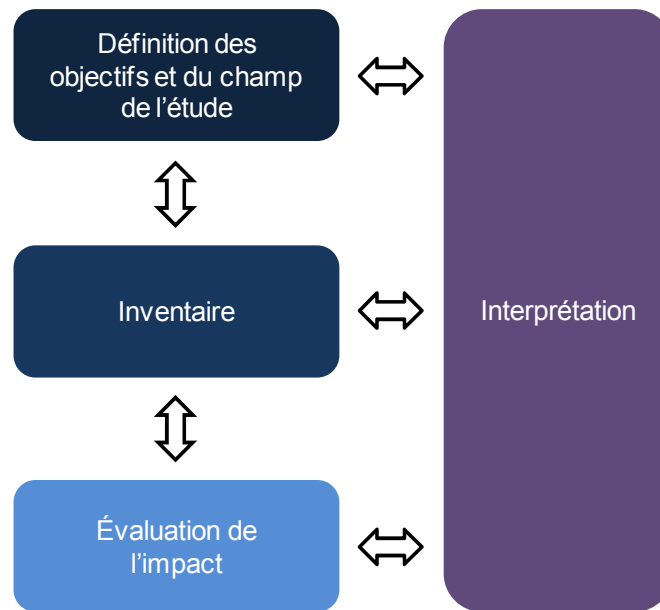


Figure I.13 : Enchaînement des quatre phases d'une ACV (NF EN ISO 14040, AFNOR 2006a).

Chaque système est modélisé par un ensemble de processus élémentaires qui en constituent les plus petites unités (Figure I.14). La frontière du système définit quels processus sont pris en compte dans l'étude et quels processus sont exclus. Au sein de cette frontière, chaque processus élémentaire doit avoir des flux d'entrée et de sortie quantifiés. Il s'agit des intrants et des extrants correspondant aux flux de produits, de matière et d'énergie entrant ou sortant d'un processus élémentaire donné. De façon idéale, les frontières du système doivent être définies de sorte que les intrants et extrants soient des flux élémentaires, c'est-à-dire correspondent à des flux de matières, de produits ou d'énergies directement puisés ou émis dans l'environnement sans transformation humaine.

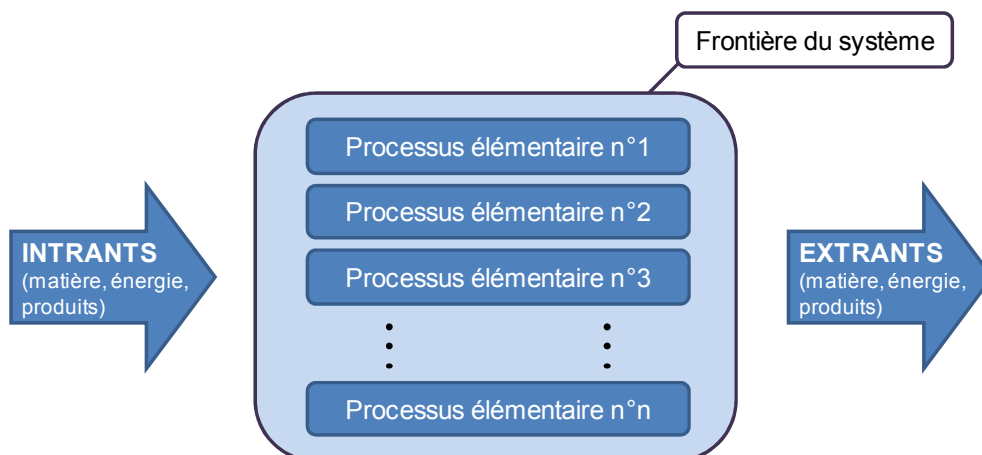


Figure I.14 : Modélisation d'un système en un ensemble de processus élémentaires.

Pour chaque système, une unité fonctionnelle est définie. Cette unité fonctionnelle se réfère à une fonction mesurable et précise une quantité définie par une unité. Les intrants et extrants du système sont normalisés par rapport à l'unité fonctionnelle.

Pour effectuer une comparaison entre deux systèmes, ceux-ci doivent avoir la même unité fonctionnelle, des frontières équivalentes et doivent également utiliser les mêmes règles de coupure pour quantifier les intrants et les extrants.

I.5.1.2 Inventaire du cycle de vie

La phase de réalisation de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) a pour objectif de quantifier les intrants et les extrants de chaque processus élémentaire inclus dans les frontières du système étudié.

Les flux entrant dans chaque processus élémentaire peuvent être classés en :

- intrants énergétiques, intrants de matières premières et autres intrants physiques,
- produits, coproduits et déchets,
- émissions dans l'eau, l'air et le sol,
- autres aspects environnementaux (bruits, odeur, etc.).

L'élaboration des ICV nécessite une bonne connaissance des processus industriels entrant en jeu. Lorsqu'un procédé induit la fabrication de plusieurs produits, l'une des questions essentielles qui se pose est de déterminer quelle proportion des intrants et extrants sont attribuées à chacun d'entre eux. Dans ce cas de figure, plusieurs règles d'allocation peuvent être appliquées. Par exemple, l'allocation peut être effectuée proportionnellement à la masse produite ou proportionnellement à son prix de vente. Il s'agit alors respectivement d'allocation massique ou économique. Le choix de la règle d'allocation peut donc modifier l'ICV du produit et par ce biais son impact environnemental. Si nécessaire, une étude de sensibilité portant sur les règles d'allocation peut être conduite. Le cas de la production de déchets est particulier. En effet, les déchets font partie des flux sortants du système et ne supportent donc aucune part des émissions dans l'environnement ce qui revient à considérer leur ICV comme nul.

Dans certains cas simples, l'étude d'inventaire du cycle de vie peut se révéler suffisante pour répondre à l'objectif fixé. Cependant, en règle générale, les données d'ICV listent un trop grand nombre de flux rendant leur interprétation complexe. La troisième phase de l'ACV vise ainsi à affecter l'ensemble des données à un nombre restreint de catégories d'impact choisies.

I.5.1.3 Évaluation des impacts

Une fois l'inventaire du cycle de vie réalisé, les données recueillies sont attribuées à différentes catégories d'impact visant à évaluer les effets du système sur l'environnement. Ces catégories d'impact peuvent être de nature très diverses et plus ou moins éloignées dans l'enchaînement des conséquences. Il existe deux familles de méthodes d'évaluation des impacts, il s'agit des méthodes dites

« midpoint » et celles dites « endpoint » (par ex. Bare *et al.* 2000, Jolliet, 2003). Certaines méthodes « mixtes » associent les deux approches.

À titre d'illustration, les émissions de gaz à effet de serre ont un impact direct sur le changement climatique via l'augmentation du forçage radiatif. La catégorie d'impact définissant cet effet est généralement intitulée « changement climatique ». Il s'agit alors d'une catégorie d'impact de type « midpoint » car l'effet quantifié est en relation directe avec les émissions de gaz à effet de serre. Les changements climatiques induits conduisent de manière indirecte à l'augmentation du niveau des océans, à leur acidification ou encore à la fonte des glaces polaires. Ces effets peuvent alors avoir une répercussion sur la biodiversité et via un enchaînement de conséquences affecter la santé humaine. Les catégories d'impact quantifiant les effets d'une émission sur la santé humaine ou sur la biodiversité sont des catégories d'impact de type « endpoint » car éloignées de l'effet direct engendré par l'émission du polluant. Une dernière étape peut consister à réunir les catégories d'impact endpoint en un score unique attribué au système étudié.

La définition des catégories d'impact et des méthodologies permettant de les calculer sont décrites par différentes méthodes présentées dans la suite de cette partie.

- Méthodes « midpoint »

Parmi ces méthodes, peuvent être citées :

- EDIP97 (Environmental Design of Industrial Products ; Wenzel *et al.* 1997), mise à jour en 2003, EDIP2003 (Hauschild & Potting, 2005).
- TRACI : Tool for the Replacement and Assessment of Chemical and other environmental Impacts (Bare *et al.* 2003) et TRACI2.0 (Bare, 2011).
- CML 2001 de l'université de Leiden aux Pays Bas (Guinée *et al.* 2002).

- Méthodes « endpoint »

Ces méthodes visent à traduire l'impact environnemental en termes de dommages sur les aires de protection que sont la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles. Certaines d'entre elles conduisent à condenser les impacts sous la forme d'un indicateur unique. Les résultats de ces méthodes sont plus faciles à interpréter par rapport aux méthodes « midpoint » mais elles souffrent d'une accumulation d'incertitudes pouvant être importantes (Finnveden *et al.* 2009). Les principales méthodes « endpoint » sont :

- Eco-indicator 99 (Goedkoop & Spriensma, 2000) qui transforme les données d'ICV en différentes catégories d'impact intermédiaires telles les effets respiratoires ou la formation de cancers. Ces deux indicateurs sont ensuite affectés à la catégorie d'impact traitant des dommages sur la santé humaine. Le dommage est estimé en nombre d'années de vie perdues dues aux maladies engendrées (approche DALY : Disability Adjusted Life Year,

développée par l'organisation mondiale de la santé).

- EPS 2000 (Steen, 1999) qui traduit l'ensemble des dommages en un indicateur unique équivalent à un coût financier.
- LIME : Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling (Itsubo & Inaba, 2003). Cette méthode affecte les résultats d'ICV à 11 catégories d'impact puis les transforme en dommages sur la santé humaine, le bien être social, les ressources naturelles et la biodiversité. À partir de ces catégories de dommages est calculé un éco-index unique exprimé en Yen.
- o Méthodes « mixtes »

Une approche mixte est également possible :

- ReCiPe 2008 (Geodkoop *et al.* 2009) fondées sur les approches utilisées par les méthodes CML 2001 et Eco-Indicator 99. Cette méthode propose une liste de 18 catégories d'impact et de trois catégories de dommages. Elle propose également une méthode de pondération et de normalisation permettant de calculer un score final fonction de l'approche adoptée : court terme optimiste, long terme sécuritaire ou intermédiaire de consensus.
- IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.* 2003) les données d'ICV sont affectées à 14 catégories d'impact (Figure I.15) elles-mêmes affectées à quatre catégories de dommages : la santé humaine, la qualité des écosystèmes, le changement climatique et la consommation de ressources naturelles.

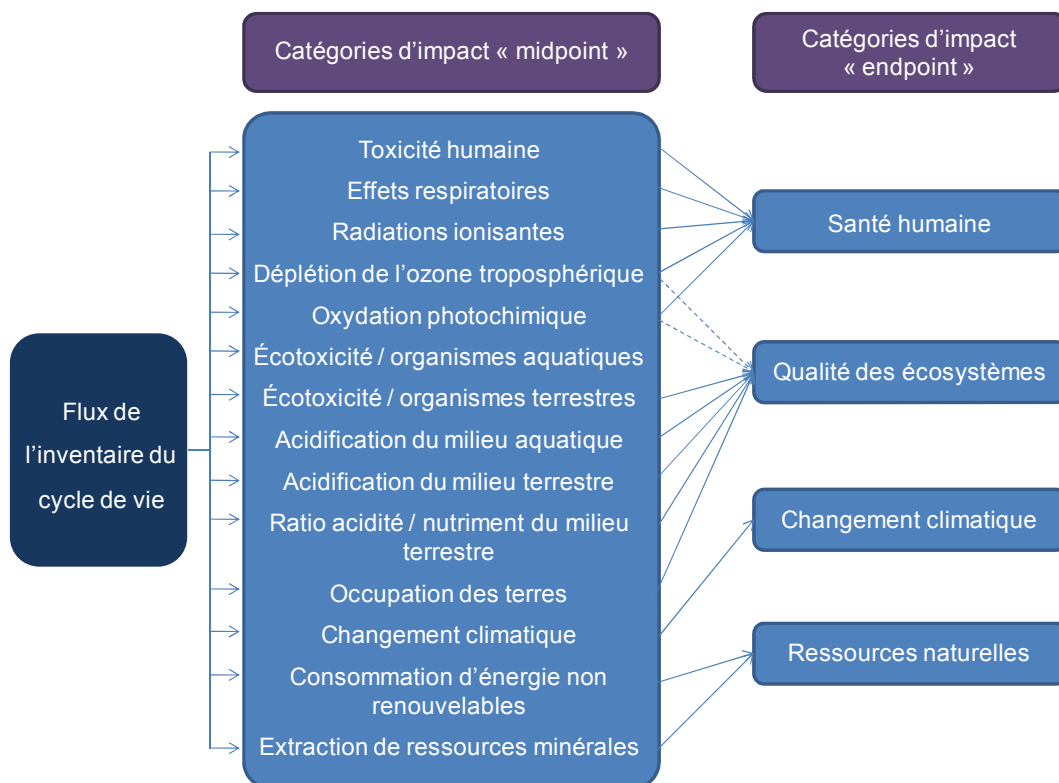


Figure I.15 : Catégories d'impact midpoint et endpoint de la méthode IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.* 2003).

I.5.1.4 Interprétation

L'interprétation correspond à la phase de l'ACV où les résultats de l'inventaire du cycle de vie et de la phase de calcul des impacts sont confrontés pour en tirer des conclusions et proposer un mode de présentation des résultats de l'ACV qui soit cohérent et compréhensible par le public visé.

La phase d'interprétation comprend également la vérification de la complétude, de la sensibilité et de la cohérence de l'étude complétée par une analyse de l'incertitude et de la qualité des données :

- le contrôle de la complétude a pour but de vérifier que l'ensemble des informations nécessaires à l'interprétation est disponible et complète. En cas d'absence d'une information jugée comme telle, les objectifs ou le champ de l'étude doivent être ajustés,
- le contrôle de la sensibilité vise à évaluer la fiabilité des résultats de l'ACV s'ils sont affectés par des incertitudes,
- le contrôle de la cohérence consiste à déterminer si les hypothèses, les méthodes et les données utilisées sont cohérentes par rapport aux objectifs et au champ de l'étude.

I.5.2 Approche de la norme NF P 01-010

La norme NF P 01-010 se fonde sur les principes de l'analyse du cycle de vie pour définir le contenu des déclarations des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction. Elle précise en outre les informations pertinentes, nécessaires et suffisantes devant apparaître dans les déclarations environnementales et établit les règles permettant de les délivrer et de les lire.

I.5.2.1 Définition des étapes du cycle de vie

La norme NF P 01-010 définit 5 étapes du cycle de vie des matériaux de construction : l'étape de production, de transport, de mise en œuvre, de vie en œuvre et de fin de vie (Figure I.16) :

- la première étape comprend l'ensemble des processus compris entre l'extraction des matières premières et la sortie d'usine du produit,
- la seconde étape correspond au transport du lieu de production des matériaux jusqu'à leur lieu de mise en œuvre,
- l'étape de mise en œuvre fait référence à la réalisation à proprement parler de l'ouvrage, de l'arrivée sur site des matériaux à la réception de l'ouvrage,
- la phase de vie en œuvre couvre l'utilisation de l'ouvrage, son entretien et sa réparation durant la période s'écoulant entre la réception de l'ouvrage et la fin de vie,

- la fin de vie de l'ouvrage inclut les diverses étapes de déconstruction et prend en compte le devenir des matériaux (réutilisation, recyclage, mise en dépôt, etc.). Toutefois, dans la majorité des cas, la fin de vie des produits de construction se déroulera au bout de plusieurs années voire dans plusieurs dizaines d'années. Face à l'impossibilité d'établir un scénario prospectif fiable, le scénario de fin de vie retenu par défaut est la mise en décharge.

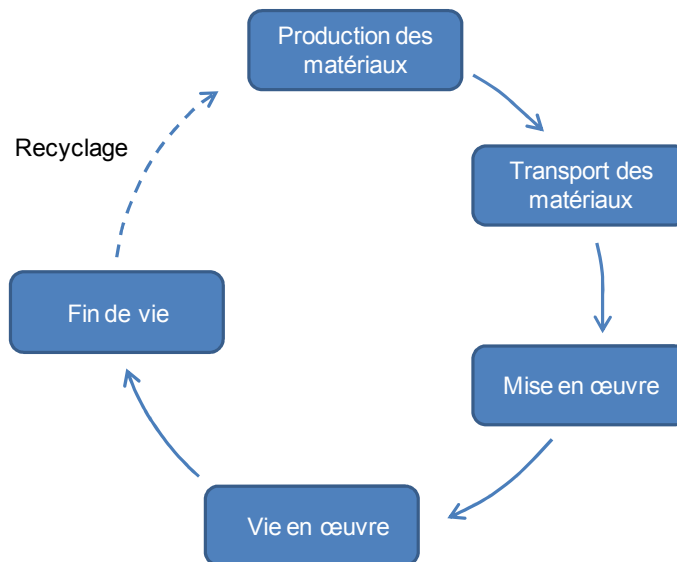


Figure I.16 : Étapes du cycle de vie des matériaux de construction.

I.5.2.2 Méthode de calcul des indicateurs

La norme NF P 01-010 propose 10 catégories d'impact consensuelles pour l'évaluation des matériaux de construction. Pour chaque catégorie d'impact, un indicateur permet de quantifier l'effet sur l'environnement. La technique de calcul des indicateurs utilise deux méthodologies, la méthode des équivalences et celle des volumes critiques.

a) La méthode des équivalences

Cette méthode consiste à convertir en une substance de référence les flux de chaque substance pouvant contribuer à un impact donné. Par exemple, chaque gaz à effet de serre contribue à l'impact « changement climatique » de façon différente. Les quantités de ces gaz sont ainsi multipliées par un coefficient de conversion spécifique pour être converties en kg équivalent CO₂ (Tableau I.8). Les coefficients de conversion dépendent des méthodes utilisées, pour la norme NF P 01-010, les valeurs sont extraites de la méthode CML 2001. À titre d'exemple, les données relatives au pouvoir radiatif servant de base au calcul des équivalents CO₂ sont issues de publications spécifiques reprises dans le cadre du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Pour le CO₂, les coefficients de conversion utilisés se trouvent dans Houghton *et al.* (1994) et (1996).

Les indicateurs calculés par la méthode des équivalences sont relatifs aux catégories d'impact suivantes :

- changement climatique,
- épuisement des ressources,
- acidification atmosphérique,
- destruction de la couche d'ozone stratosphérique,
- formation d'ozone photochimique.

Tableau I.8 : Coefficients de conversion à 100 ans pour les trois principaux gaz à effet de serre (NF P01-010).

Flux	Coefficient de conversion (kg éq. CO ₂ / kg)
CH ₄	21
CO ₂	1
N ₂ O	310

b) La méthode des volumes critiques

La méthode permet de calculer les volumes d'eau ou d'air nécessaires pour diluer un polluant donné afin que sa concentration soit inférieure à un seuil fixé. Les seuils utilisés par la norme NF P01-010 sont définis dans l'article 27 de l'arrêté du 02 février 1998. L'indicateur correspond à la somme des volumes d'eau ou d'air nécessaire pour diluer chacun des polluants émis par le système.

I.5.3 État de l'art dans le secteur de la construction

Dans le domaine du génie civil, l'essentiel des évaluations environnementales portent sur les ouvrages d'art et bâtiments. Les études portant sur les terrassements à proprement parler sont plus rares. Dans ce qui suit, l'approche proposée est brièvement présentée.

Dans un premier temps, quelques résultats relatifs aux bâtiments et ouvrages d'art sont présentés. Puis, dans un second temps sont exposés des résultats d'analyse du cycle de vie de chaussées et de phases de terrassement.

I.5.3.1 Bâtiments et ouvrages d'art

La pratique de l'analyse du cycle de vie dans le domaine de la construction de bâtiments est assez répandue (Erlandsson *et al.* 2003 ; Sharma *et al.*, 2011). Les études peuvent par exemple porter sur des variantes de construction telle l'utilisation de murs de structures particulières (par ex. Börjesson & Gustavsson, 2000 ; Monteiro & Freire, 2012). Ainsi, Monteiro & Freire (2012) comparent six types de murs extérieurs d'une maison individuelle. Les résultats de la comparaison entre une

structure en briques et une structure en bois (Tableau I.9) montrent que la structure en bois réduit l'impact environnemental pour l'ensemble des catégories calculées avec la méthode CML 2001. La réduction la plus importante concerne le changement climatique avec une réduction de plus de 50 % de la valeur de l'indicateur. Lors de cette étude, les phases du cycle de vie prises en compte sont : la production des matériaux, leur transport, la vie en œuvre (maintenance, climatisation, chauffage). La phase de construction et de fin de vie sont exclues.

Tableau I.9 : Comparaison des impacts calculés selon la méthode CML 2001 entre une structure de mur en briques et un structure en bois (Monteiro & Freire, 2012).

Catégorie d'impact	Unité	Structure en briques	Structure en bois
Épuisement des ressources	kg éq. Sb	$2,67 \cdot 10^2$	$2,18 \cdot 10^2$
Acidification	kg éq. SO ₂	$1,47 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^2$
Eutrophisation	kg éq. PO ₄	$2,32 \cdot 10^1$	$1,96 \cdot 10^1$
Changement climatique	kg éq. CO ₂	$4,38 \cdot 10^4$	$2,10 \cdot 10^4$
Destruction de l'ozone stratosphérique	kg éq. CFC-11	$8,32 \cdot 10^{-2}$	$9,34 \cdot 10^{-2}$
Formation d'ozone photochimique	kg éq. C ₂ H ₄	$9,23 \cdot 10^0$	$7,95 \cdot 10^0$
Toxicité humaine	kg éq. 1,4 DB	$1,52 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^4$
Toxicité eau douce	kg éq. 1,4 DB	$4,17 \cdot 10^3$	$4,06 \cdot 10^3$
Toxicité marine	kg éq. 1,4 DB	$5,69 \cdot 10^6$	$5,13 \cdot 10^6$
Écotoxicité	kg éq. 1,4 DB	$1,82 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^2$

CFC-11 : Trichlorofluorométhane ; DB : dichlorobenzène ;

D'autres études ont montré que l'étape de vie en œuvre représente l'impact le plus élevé, pouvant atteindre 80 à 85 % de l'énergie consommée sur la totalité du cycle de vie (Adalberth *et al.* 2001). L'étape de production des matériaux de construction représente, quant à elle, la seconde contribution la plus élevée. Bribian *et al.* (2009) rapportent que la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ sur le cycle de vie d'une maison résidentielle représente respectivement 30 et 41 % du total des phases de production et de vie en œuvre. De manière générale et quel que soit le type de bâtiment, Sartori & Hestnes, (2007) rapportent en se fondant sur 60 études de cas, que les matériaux de construction représentent entre 2 et 38 % de l'énergie totale utilisée. (Figure I.17).

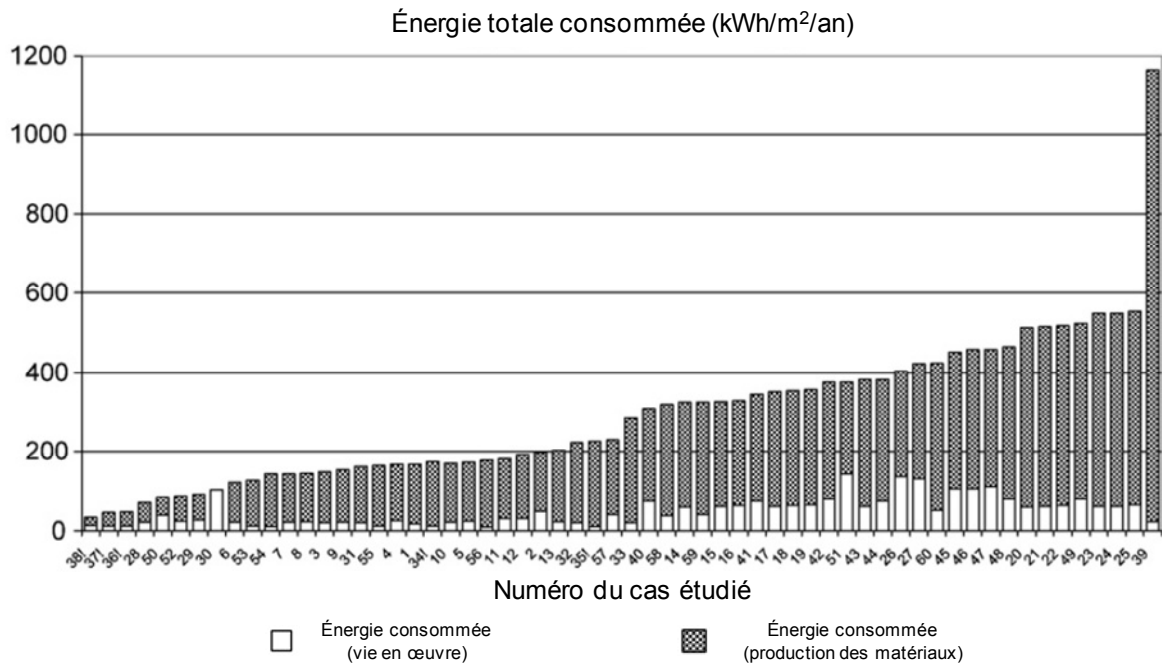


Figure I.17 : Consommation d'énergie de 60 bâtiments, comparaison entre l'énergie consommée pour les phases de production des matériaux et de vie en œuvre (Sartori & Hestnes, 2007).

Pour les ouvrages d'art, l'analyse du cycle de vie d'un pont a été entreprise par un groupe de travail (Cimbéton, 2010). L'évaluation des impacts a été menée suivant la méthode d'évaluation des impacts utilisée dans la norme NF P 01-010. La phase de construction représente l'étape dont l'impact est le plus élevé (31 à 97 %) suivie de l'étape de vie en œuvre (2 à 56 %). La fin de vie contribue à moins de 6 % pour chacune des catégories d'impact. Pour une même phase du cycle de vie, il existe toutefois une forte disparité entre catégories d'impact. Par exemple, la fabrication des matériaux représente 97 % de la production totale de déchets solides mais moins d'un tiers (31 %) de la pollution de l'eau générée au cours du cycle de vie.

I.5.3.2 Terrassements et ouvrages linéaires

Les étapes de terrassement sont prises en compte dans une étude de cas de la construction d'une plateforme d'un immeuble (Li *et al.* 2010). Cette étude inclut l'excavation de 60 000 m³ de sol et la construction de murs de soutènement. L'étude utilise la méthode endpoint EPS (Steen, 1999) fondée sur la monétarisation des impacts environnementaux. Les résultats indiquent que la phase de terrassement (excavation et remblaiement) représente 26 % des impacts environnementaux et affecte essentiellement la santé humaine via les émissions de poussières (Figure I.18).

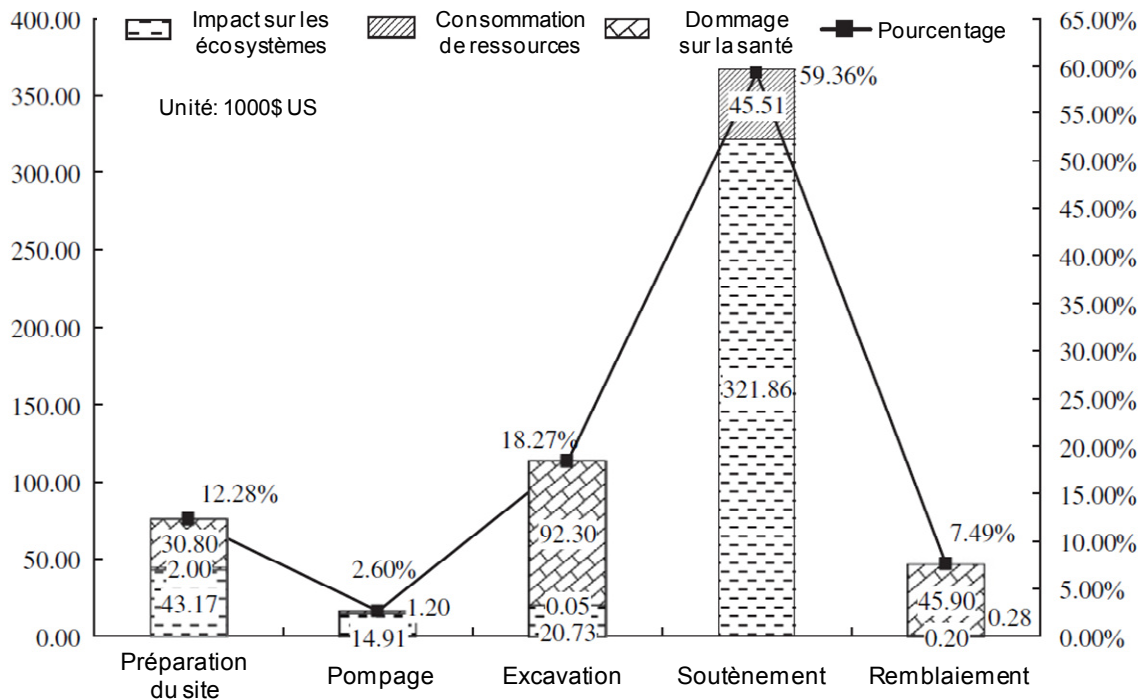


Figure 1.18 : Distribution des impacts environnementaux en fonction des étapes de construction (Li et al. 2010).

Dans le domaine de la construction routière, Muench (2010), liste 14 études d'analyse du cycle de vie relatives à la construction de routes publiées entre 2000 et 2009. Cependant, parmi ces 14 citations, toutes n'ont pas été validées par la communauté scientifique. Mroueh *et al.* (2001) comparent par exemple quatre variantes visant à améliorer le sol support de la chaussée constitué d'argiles compressibles. Les solutions proposées sont listées ci-dessous :

- remplacement du sol en place par un remblai de matériaux granulaire,
- stabilisation du sol avec du ciment appliqué au taux de 100 kg/m^3 ,
- deep mixing avec 120 kg/m^3 de ciment,
- consolidation du sol par mise en place de drains verticaux (espacement d'un mètre entre chaque drain).

Les impacts environnementaux ont été évalués à travers 12 catégories (NO_x , poussières, CO_2 , SO_2 , consommation de carburant, etc.) (Figure 1.19). La solution la plus préjudiciable pour l'environnement est celle correspondant au traitement de sol suivie par le deep mixing, puis par la solution consistant à remplacer le sol par des matériaux granulaire et enfin le drainage. Selon les auteurs, les deux premières solutions sont particulièrement pénalisées par l'utilisation de quantités importantes de ciment dont la production est très consommatrice d'énergie et génère des émissions polluantes importantes.

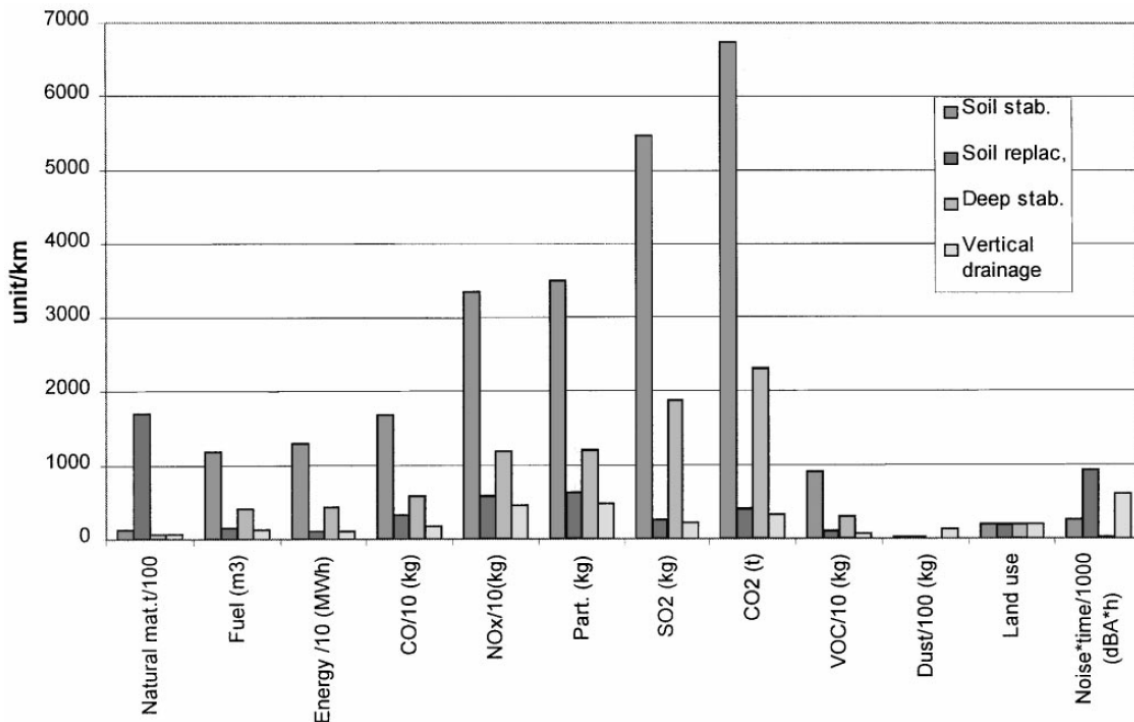


Figure I.19 : Consommation de ressources et émission de polluants pour les quatre variantes constructives (Mroueh et al. 2001).

Certaines études portent sur l'utilisation de matériaux de substitution aux granulats naturels tels les cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux ou béton recyclé (par ex. Mroueh et al. 2001, Chowdhury et al. 2010 ; Fevre-Gautier et al. 2012). Un exemple de résultat peut être illustré par la consommation d'énergie nécessaire à la construction de routes à partir de matériaux alternatifs. Mroueh et al. (2001) comparent différentes structures de chaussées faisant intervenir des cendres volantes, des laitiers de hauts fourneaux et des bétons recyclés. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des matériaux alternatifs ne conduit pas systématiquement à une réduction de la consommation d'énergie (Figure I.20). Par ailleurs, la fabrication des matériaux de construction correspond à la phase la plus consommatrice en énergie et la plus variable. Enfin, la phase de construction représente tout au plus quelques pourcents de la consommation totale.

Les fortes variabilités entre alternatives sont expliquées par les différences de matériaux utilisés lors de la construction. Par exemple, la variante FA2 prévoit l'addition de cendres volantes mélangées à du ciment alors que la variante FA3 considère une utilisation de cendres volantes seules.

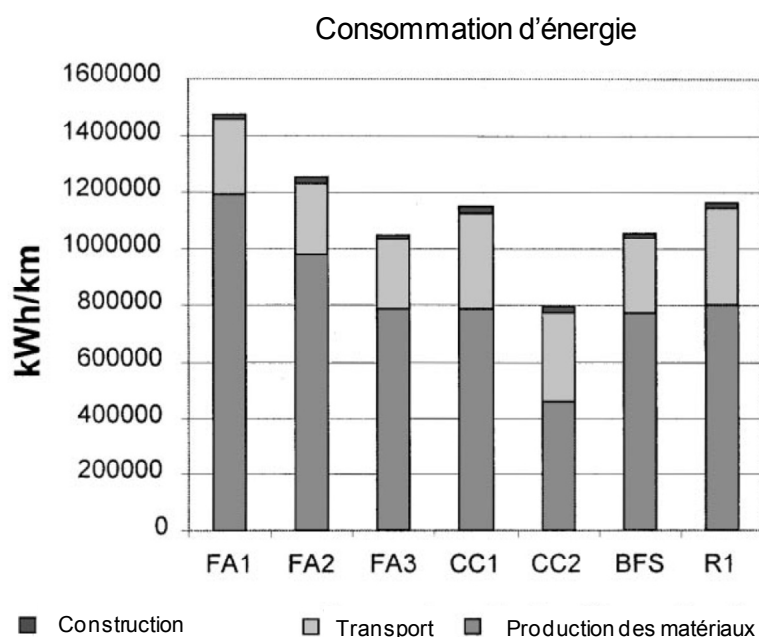


Figure I.20 : Consommation d'énergie pour différentes variantes de construction de chaussées : FA 1 à 3, cendres volantes ; CC 1 et 2 béton recyclé ; BFS, laitier de hauts-fourneaux ; R1, granulats naturels (Mroueh et al. 2001).

I.5.4 Bilan

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation multicritère des impacts environnementaux associés à un système. Les normes ISO 14040 et ISO 14044 en définissent les principes. Toutefois, lors de la réalisation de l'étude, le praticien doit effectuer des choix portant sur la définition des frontières du système, sur les données d'inventaire, mais aussi sur la méthode d'évaluation des impacts. Ces choix doivent être adaptés à l'objectif de l'étude et sont donc fréquemment différents d'une étude à l'autre. Dans le domaine de la construction, la norme française (NF P 01-010) a, par exemple, fixé une méthode fondée sur le calcul de dix indicateurs environnementaux jugés comme pertinents pour l'évaluation des matériaux de construction. Toutefois, dans le domaine du terrassement, les études sont peu nombreuses et les spécificités à prendre en compte dans ce domaine restent à définir. Une attention particulière sera par ailleurs portée sur les particularités environnementales associées aux produits non traditionnels.

I.6 Conclusion

Les principales utilisations actuelles des produits non traditionnels concernent les problématiques d'entretien des routes non revêtues pour lesquelles des solutions plus économiques et plus écologiques sont recherchées. Ainsi, les performances de nombreux sous-produits ou déchets industriels ont été testées pour limiter la fréquence d'entretien et par conséquent, le coût et l'impact environnemental de la

maintenance de ces ouvrages. Parmi les produits non traditionnels disponibles, certains dérivent de la transformation de matières premières renouvelables et présentent de ce fait un intérêt potentiel dans le cadre du développement durable. Ainsi, le choix de produits s'est porté sur ces catégories : les produits acides contenant du limonène sulfonaté, les enzymes et les lignosulfonates. Cependant, avant de juger de l'efficacité des traitements sur la réduction du bilan environnemental des chantiers de terrassement, il est nécessaire de caractériser et quantifier leur action sur les sols.

Les résultats des études concernant l'utilisation de traitement non traditionnels ont montré qu'ils pouvaient apporter des améliorations des propriétés hydromécaniques dans certaines situations. Au contraire, dans certains cas, les traitements ont conduit à dégrader les propriétés des sols. La recherche des mécanismes d'action est une des clefs d'accès à une meilleure compréhension du comportement des sols traités. Toutefois, les mécanismes proposés dans la littérature ne permettent pas systématiquement de donner une explication satisfaisante des modifications observées.

Ainsi, l'utilisation de traitements non traditionnels soulève un certain nombre d'interrogations. Des questionnements demeurent quant aux effets à court et à long termes des produits sur les propriétés géotechniques des sols. La question sous jacente étant de définir si les modifications affectent les propriétés intrinsèques du sol ou uniquement ses caractéristiques à court terme. Par ailleurs, seuls certains composés contenus dans les produits de traitement sont biodégradables. Il est de ce fait nécessaire de caractériser l'évolution de ces produits une fois mélangés au sol pour anticiper les potentiels effets des traitements à plus long terme. Afin de comprendre les mécanismes d'action à l'œuvre, l'étude doit également s'intéresser aux interactions entre les produits et les composés du sol. Une évaluation des effets des traitements sur la microstructure des sols apportera des informations complémentaires utiles.

L'étude expérimentale doit permettre de définir les applications de chacun des traitements et d'identifier leurs apports potentiels sur le bilan environnemental des opérations de terrassement en prenant en compte l'ensemble des phases du cycle de vie de l'ouvrage construit en sol traité depuis la production des matières premières jusqu'à sa fin de vie. Ainsi, il sera possible d'identifier la variante présentant le meilleur compromis entre amélioration technique et environnementale.

Chapitre II :

Caractéristiques des sols et des produits de traitement

II.1 Introduction

L'étude du comportement des sols traités avec des produits non traditionnels se fonde sur la description des caractéristiques géotechniques des sols lors de leur mise en œuvre et sur l'évolution de ces caractéristiques au cours du temps. Dans le cadre de cette étude, un limon de type A2 et un sol argileux de type A3 ont été sélectionnés. Pour chaque modalité, les propriétés mécaniques (caractéristiques de compactage, de portance, de résistance à la compression simple) et les caractéristiques d'identification (valeur au bleu de méthylène, indices de plasticité) sont testées. En fonction des résultats obtenus, des essais hydromécaniques complémentaires sont conduits (essais de gonflement, mesure de la conductivité hydraulique) et complétés par l'étude de la microstructure. De plus, pour les traitements ayant montré les meilleures potentialités, des essais sont effectués sur des matériaux non plastiques de type B5 et D1 afin d'étudier la sensibilité du traitement par rapport à la nature des sols.

Dans un premier temps, ce chapitre décrit les procédures de traitement employées, puis rassemble les principales caractéristiques des produits non traditionnels utilisés. Les propriétés des sols non traités sont ensuite détaillées. Enfin, même si l'objectif premier de l'étude n'est pas d'effectuer une comparaison directe entre les traitements non traditionnels et traditionnels, les résultats obtenus pour un traitement à la chaux et au ciment sont présentés. Cette dernière partie permettra de mettre en perspectives les applications potentielles des produits non traditionnels.

II.2 Protocoles expérimentaux

Les protocoles expérimentaux sont en partie fondés sur les normes régissant leur réalisation. Toutefois, des adaptations sont nécessaires pour prendre en compte la spécificité des traitements étudiés.

II.2.1 Procédure de traitement

Les procédures de traitement employées décrivent la démarche pour mettre à teneur en eau et mélanger les produits de traitement au sol. Une distinction est faite entre les produits liquides (solution acide et enzymatique) et le produit solide (lignosulfonate). Les dosages mentionnés sont des dosages massiques définis comme le ratio entre la masse de produit concentré sur la masse de sol sec traité. Les teneurs en eau initiales des sols sont nulles sauf pour l'argile ($w_i = 14\%$).

II.2.1.1 Produits liquides

Les produits liquides sont utilisés à des dosages massiques très faibles, généralement inférieurs à 0,01 %. De ce fait, la masse de produit nécessaire au traitement est prélevée à l'aide d'une seringue et pesée sur une balance de précision. Une fois prélevée, la quantité de produit est mélangée à une quantité d'eau distillée représentant trois points de teneur en eau. Cette étape de dilution du produit de traitement permet d'assurer un bon mélange entre le produit et le sol.

Lorsque la masse de produit requise est trop faible, une quantité d'un gramme est prélevée. Le produit est ensuite dilué dans un volume d'eau calculé de façon à ce que la masse de solution ajoutée au sol corresponde à une augmentation de trois points de la teneur en eau tout en apportant la quantité requise de produit. Cette démarche limite l'incertitude sur le dosage appliqué.

Pour l'ensemble des essais hydro-mécaniques, la démarche suivante est appliquée.

- Le sol est mis à une teneur en eau inférieure de 3 points de la teneur en eau visée en ajoutant progressivement de l'eau distillée lors du malaxage.
- Le mélange est conservé durant un minimum de 24 heures en sac plastique hermétiquement fermé. Cette étape permet l'homogénéisation de la teneur en eau du sol.
- Le produit est mélangé à la quantité d'eau requise pour augmenter de trois points la teneur en eau du sol. La solution obtenue est ajoutée progressivement lors du malaxage.
- Chaque prise d'essai est conservée une heure dans un sac plastique hermétiquement fermé.

II.2.1.2 Produit solide

Parmi les produits non traditionnels utilisés, seul le lignosulfonate se présente sous forme d'un solide. Cette particularité permet d'ajouter le produit directement sous forme de poudre lors des opérations de malaxage. La quantité de lignosulfonate est calculée en tenant compte de sa teneur en eau de 8 %.

- Le sol est mis à la teneur en eau visée puis conservé dans un sac hermétiquement fermé durant 24 heures minimum.
- La quantité de lignosulfonate nécessaire est pesée puis mélangée au sol lors du malaxage.
- Le sol est conservé une heure en sac plastique hermétiquement fermé.

II.2.1.3 Spécificités selon la nature des sols

Pour l'ensemble des sols, la procédure de traitement pour un produit donné est identique à l'exception de l'étape de malaxage. La mise à teneur en eau et le

traitement du limon et de l'argile est effectuée au malaxeur à couteaux. Toutefois, pour le traitement des sables, l'étape de malaxage est réalisée à la main afin d'éviter tout concassage des grains.

II.2.2 Essais géotechniques

Les essais géotechniques réalisés sont classés en deux catégories : les essais hydromécaniques, reflet des propriétés physiques du matériau fonction de son état et les essais sur les caractéristiques d'identification, relatives aux propriétés intrinsèques des sols.

II.2.2.1 Propriétés hydromécaniques

Une fois le sol préparé, différents essais hydromécaniques sont conduits. Cette partie décrit les démarches employées.

a) Courbes de compactage Proctor

Les courbes de compactage sont déterminées selon les recommandations de la norme NF P 94-093 (AFNOR, 1999). Avant compactage, le matériau est préparé selon la procédure de traitement décrite au paragraphe II.2.1. Le compactage est effectué dans des moules CBR. Un compacteur automatique de marque Compacto[®] est utilisé pour la réalisation des essais (Figure II.1a).

b) Portance

La portance du sol compacté est caractérisée par la mesure de l'Indice Portant Immédiat (IPI). Les mesures sont effectuées directement après compactage du sol à l'aide d'une presse munie d'un capteur de 10 kN (Figure II.1b) selon la norme NF P 94-078 (AFNOR, 1997).



Figure II.1 : Damme Proctor automatique et moule CBR positionné (a), dispositif de mesure de la portance (b).

Les mesures des indices CBRi après quatre jours d'immersion sont également effectuées selon la norme NF P 94-078.

La courbe de portance est représentée sous la courbe de compactage pour l'ensemble des graphiques du présent document.

c) Résistance à la compression simple

Les éprouvettes sont confectionnées par compactage statique suivant la méthode du double pistonnage dans un moule cylindrique de 0,05 m de diamètre et 0,10 m de hauteur (Figure II.2). Lors de la confection, la teneur en eau et la masse volumique sèche optimale sont visées avec une latitude de respectivement $\pm 1\%$ et $\pm 0,01 \text{ Mg/m}^3$. Après confection, chaque éprouvette est pesée et sa géométrie vérifiée. Chaque lot comprend trois éprouvettes conservées à 20°C emballées dans un film cellophane et recouvertes d'une feuille d'aluminium. Le lot est également scellé hermétiquement sous plastique.

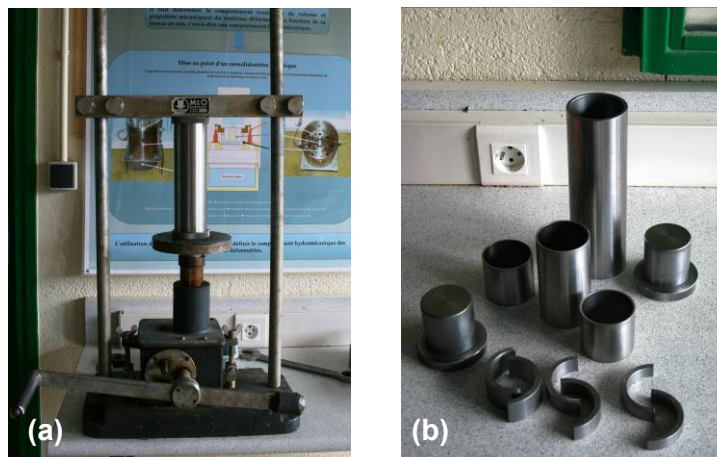


Figure II.2 : Presse utilisée pour le compactage par double pistonnage des éprouvettes (a), matériel de confection des éprouvettes (b).

À échéance du temps de cure, les dimensions et la masse des éprouvettes sont contrôlées. Les valeurs de résistance à la compression simple obtenues sont moyennées sur les trois éprouvettes de chaque lot. La mesure de la teneur en eau après essai permet de vérifier la bonne conservation des échantillons et de calculer la masse volumique sèche réelle de chaque éprouvette.

La valeur de résistance à la compression simple est une valeur moyenne obtenue sur chaque lot de trois éprouvettes. Les barres d'erreur donnent une idée de la variabilité en encadrant la valeur moyenne de plus ou moins un écart type.

d) Potentiel de gonflement et coefficient de conductivité hydraulique

Le gonflement unidimensionnel libre est mesuré à l'oedomètre sur des éprouvettes de hauteur initiale $H_0 = 15 \text{ mm}$ et de 70 mm de diamètre, compactées de façon statique. L'évolution du gonflement est suivie au cours du temps au fur et à mesure

de l'augmentation du degré de saturation de l'éprouvette jusqu'à obtention d'une valeur stable.

Les mesures des coefficients de perméabilité sont effectuées par la méthode à charge variable après saturation des éprouvettes. Une fois le gonflement stabilisé, une charge hydraulique initiale de 0,60 m est appliquée. La mesure de perméabilité est effectuée lorsqu'un régime permanent d'écoulement est atteint. A la fin de l'essai, le degré de saturation de l'éprouvette est calculé.

II.2.2.2 Caractéristiques d'identification

Les essais portent sur l'identification des indices de plasticité, de la surface spécifique et du pH des sols traités.

a) Indices de plasticité

Pour chaque sol, un lot unique de matériau non traité tamisé à 400 µm est préparé selon la norme NF P 94-051 (AFNOR, 1993). Cette démarche permet de limiter les sources de variabilité liées à la prise d'essai. À partir de ce lot est prélevée la quantité de sol nécessaire à chaque essai. Le traitement est effectué par ajout des produits soit en solution, soit directement sous forme solide en fonction de la nature des produits. Une fois le mélange homogénéisé, le sol est laissé une heure au repos.

La limite de liquidité est mesurée par la méthode du cône de pénétration par humidification progressive du sol selon NF P 94-052-1 (AFNOR, 1995). La limite de liquidité est déterminée à partir de courbes possédant au moins cinq points. Chaque point représente la valeur moyenne d'au minimum trois mesures d'enfoncement.

La limite de plasticité est obtenue par la méthode des rouleaux (NF P 94-051, AFNOR 1993), les valeurs présentées sont des moyennes effectuées sur cinq essais minimum.

b) Valeur d'adsorption du bleu de méthylène

La valeur d'adsorption du bleu de méthylène des sols traités est mesurée selon la norme NF P 94-068 (AFNOR, 1998). Les valeurs de bleu du sol (VBS) sont mesurées sur les éprouvettes ayant servi à la mesure des résistances à la compression simple après une cure de 7 et 28 jours.

c) pH

Les mesures de pH des sols sont effectuées suivant la norme NF ISO 10390 (AFNOR, 2005) en utilisant une sonde Voltcraft® PH-212 à compensation automatique de température.

II.2.3 Essais de caractérisation de la microstructure

Les éprouvettes de sol sont préparées suivant la procédure de confection des éprouvettes servant à la mesure de la résistance à la compression simple (cf. II.2.2.1). Une cure de 28 jours à 20°C est appliquée. À échéance, des échantillons de deux à trois centimètres cube de volume sont extraits de l'éprouvette. Les échantillons prélevés sont alors congelés dans de l'azote liquide puis lyophilisés et conservés dans des piluliers scellés à la paraffine.

II.2.3.1 Microscopie électronique à balayage

Les essais de microscopie électronique à balayage sont réalisés sur un Microscope Électronique à Balayage (MEB) JEOL JXA – 840 disponible dans les locaux d'Égis géotechnique à Seyssins (Figure II.3). Les échantillons de sol sont coupés et un fragment de quelques mm³ est extrait. Le fragment est alors fixé à l'aide d'une résine sur un support puis métallisé à l'or. Le microscope permet de visualiser la morphologie des composés du sol grâce à l'analyse des électrons secondaires émis par l'échantillon. Dans certaines conditions, les composés peuvent être identifiés grâce au module d'analyse des photons X dont est doté l'appareil.



Figure II.3 : Dispositif de microscopie électronique à balayage.

II.2.3.2 Porosimétrie par intrusion de mercure

Les essais de porosimétrie comprennent deux injections successives de mercure. Lors de la première injection, les pores de l'échantillon sont initialement vides, du mercure est alors injecté par pression croissante remplissant progressivement les pores de rayons d'entrée décroissants. La gamme de pore pouvant être investie par le mercure est comprise entre 0,0015 µm et 90 µm.

Lorsque la première injection est achevée, l'échantillon est ramené à la pression initiale. Lors de cette phase, du mercure peut sortir de l'échantillon. Une seconde injection est alors entreprise selon les mêmes modalités. Le volume de mercure injecté lors de cette seconde phase correspond à la porosité libre, alors que le

mercure restant dans l'échantillon donne accès à la porosité occluse. Un graphique représentant la répartition des rayons d'entrée des pores est obtenu en dérivant les courbes d'injection par rapport au rayon d'entrée des pores. Afin de comparer les résultats entre eux, les courbes d'injection sont normalisées par rapport au volume injecté dans les échantillons de sol non traité.

II.2.4 Mesure de la tension superficielle

Les mesures de la tension superficielle de solution aqueuses sont effectuées par la méthode de l'anneau de Du Noüy (1919) dont un dispositif est disponible au Laboratoire Environnement et Minéralurgie (LEM) à Nancy (Figure II.4). La méthode consiste à mesurer la force nécessaire pour retirer un anneau en platine immergé dans la solution (Figure II.5). Afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures, un minimum de deux cycles de dix mesures est conduit pour chaque concentration testée. L'anneau en platine est passé à la flamme entre chaque cycle de mesures et son gabarit corrigé.

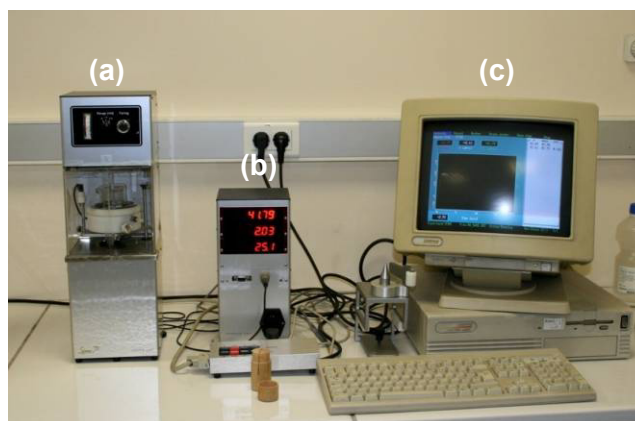


Figure II.4 : Dispositif de mesure de la tension superficielle ; balance de précision (a), affichage des grandeurs mesurées (b), ordinateur de pilotage de l'expérience (c).

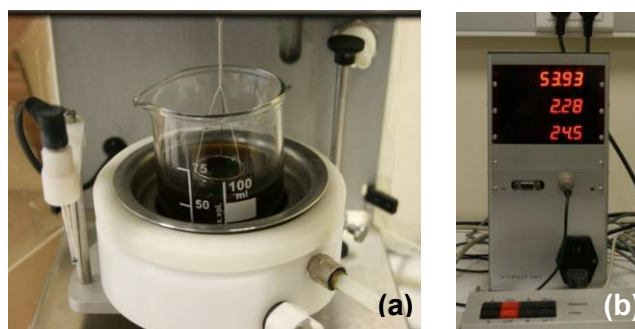


Figure II.5 : Bécher contenant la solution dans laquelle l'anneau de platine est plongé (a), les valeurs indiquées en (b) correspondent de haut en bas à la tension superficielle mesurée (mN/m), l'enfoncement de l'anneau par rapport à la surface du liquide (mm), la température de la pièce (°C).

Avant de débuter une séance de mesure, la première étape consiste à réaliser les solutions aux concentrations désirées. Les quantités de produits nécessaires sont

pesées puis diluées dans le volume requis d'eau distillée. L'incertitude sur la concentration est estimée à 0,01 %. Une fois préparées, les solutions sont conservées dans des flacons hermétiquement clos durant une nuit pour qu'ils atteignent l'équilibre thermique avec l'air ambiant de la pièce. En effet, la tension superficielle diminue d'environ 0,2 mN/m par degré d'augmentation de la température (Du Noüy, 1919). Lors des essais, les températures étaient comprises entre 20 et 27°C. Le bécher servant à l'expérience est soigneusement nettoyé à l'eau déminéralisée puis une mesure de contrôle est effectuée avec de l'eau distillée. La valeur mesurée doit alors être égale à la tension superficielle de l'eau à 20° C, soit 72 ± 1 mN/m pour que la mesure soit valable.

II.3 Caractéristiques des produits non traditionnels

Pour chacune des catégories de produits non traditionnels, un produit particulier est choisi. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur des produits ayant fait l'objet d'études scientifiques par le passé et dont des applications ont été réalisées ou sont envisagées en Europe. Ainsi, l'ISS, la Permazyme 11X et un lignosulfonate de calcium appartenant respectivement à la famille des solutions acides, des solutions enzymatiques et des lignosulfonates ont été choisis. Les paragraphes suivants détaillent les principales caractéristiques des ces produits.

II.3.1 Choix des dosages

Le choix des dosages fait appel aux données publiées dans la littérature ainsi qu'aux recommandations des fournisseurs.

Pour la famille des produits acides, les dosages courants sont compris entre 0,01 % et 0,2 %. Les résultats de la littérature indiquent dans ce cas que la résistance à la compression simple et les caractéristiques de compactage des sols n'ont pas été modifiées par un changement de dosage (par ex. Tingle & Santoni, 2003). De même, les caractéristiques minéralogiques n'ont pas été modifiées y compris pour des dosages pouvant atteindre 50 % de produit par masse sèche de sol (Rauch *et al.* 2003). Ainsi, dans le cas de l'ISS, le dosage de 0,01 % recommandé par le fournisseur est retenu. Cependant, quelques essais à des dosages supérieurs permettront de vérifier la sensibilité des résultats par rapport à ce choix.

Les résultats obtenus après traitement avec des solutions enzymatiques ont également montré une très faible sensibilité des paramètres mécaniques par rapport au dosage (Tingle & Santoni, 2003 ; Velasquez *et al.* 2006). Pour ce type de produit, les dosages classiques sont compris entre 0,002 % et 0,1 %. Ainsi, le dosage de 0,002 % recommandé par le fournisseur a été retenu. Toutefois, peu d'informations concernant l'influence du dosage sur les propriétés de compactage sont disponibles. Il est de ce fait nécessaire de tester ce paramètre.

Dans le cas du lignosulfonate, les résultats des essais mécaniques ont montré une sensibilité forte des paramètres par rapport au dosage. La résistance à la compression simple maximale est obtenue pour un dosage de 5 % (Santoni *et al.* 2002 ; Tingle & Santoni, 2003). En revanche, la portance maximale d'un sol traité avec un lignosulfonate a été atteinte pour un dosage de 0,5 % (Gow *et al.* 1961). Toute augmentation de dosage conduisant alors à dégrader la portance du sol. Compte tenu de ces résultats, il paraît donc essentiel de tester différents dosages. Ainsi, les dosages de 0,5 ; 2,0 et 5,0 % ont été testés.

II.3.2 Produit organique acide

L'ISS est une solution aqueuse de couleur noire contenant de l'acide sulfurique (Figure II.6). La densité de la solution est de 1,150 et sa teneur massique en acide sulfurique pur de l'ordre de 9 %. S'ajoutent à l'acide sulfurique différents composés énumérés ci-dessous.

- Citrus stripper oil, il s'agit d'un sous-produit des industries produisant de la mélasse à partir d'agrumes. Ce composant contient entre 94 et 98 % de D-limonène (Merritt, 1991) se trouvant sous forme sulfonaté après réaction avec l'acide sulfurique (Katz *et al.* 2001).
- Laurylsulfate de sodium, il s'agit d'un produit tensioactif également nommé Sodium Dodecyl Sulfate (SDS).
- 1,3-diethylurea, dont l'action est de limiter la corrosion des métaux au contact du produit de traitement.
- Sulfate de magnésium.

La quantité de matière sèche a été estimée à 30 % par étuvage à 60°C. De plus, du fait de la concentration importante en acide sulfurique, la solution est fortement acide. Diluée à 1,0 g/L, le pH de la solution est de 2,4.

Afin de conserver le produit dans des conditions optimales, celui-ci doit être stocké à une température comprise entre - 5 et + 60°C à l'abri du rayonnement solaire direct. Dans ces conditions, le produit se conserve sans limitation de durée. Au cours de cette étude, l'ISS était stocké dans une salle aveugle climatisée à 20°C.

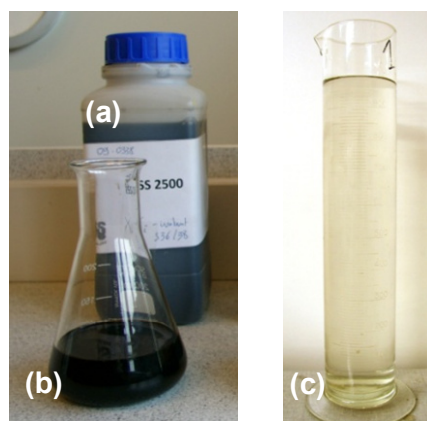


Figure II.6 : Récipient contenant l'ISS (a), aspect de la solution concentrée (b) et diluée à 1,0 g/L (c).

La composition élémentaire de l'ISS a été déterminée au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) par spectrométrie de masse après ionisation à la torche à plasma (ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Les résultats obtenus (Tableau II.1) indiquent la présence de 814 mg/kg de magnésium, élément le plus abondant avant le zinc (125 mg/kg) et le nickel (85 mg/kg). Quelques éléments métalliques toxiques sont également présents à des teneurs supérieures à 1 mg/kg (Cr, Pb, Zn par exemple).

Tableau II.1 : Composition élémentaire de l'ISS déterminée par ICP-MS.

Élément	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Na	Ni	Pb	Si	Sr	V	Zn
Teneur (mg/kg)	4,0	1,5	15	1,1	18	814	6,0	85	33	1,9	1,9	1,7	125
Teneur <1,0 mg/kg	Al, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ho, In, K, La, Lu, Mn, Nd, P, Pr, Rb, Sm, Ti, Tb, Th, Tm, U, W, Y												

Afin d'estimer l'impact potentiel sur l'environnement de la présence des métaux toxiques, leurs teneurs peuvent être comparées aux valeurs relevées dans les sols agricoles français (Baize *et al.* 2007).

Les teneurs mesurées dans l'ISS concentré sont proches des valeurs classiquement observées dans les sols (Tableau II.2). De plus, au dosage de 0,01 %, la dilution du produit est telle que l'apport d'éléments métalliques toxiques est négligeable.

Tableau II.2 : Comparaison des teneurs en éléments traces métalliques toxiques dans l'ISS et dans les sols agricoles français.

Élément	Teneurs dans les sols agricoles français (Baize <i>et al.</i> 2007)	Teneur dans l'ISS non dilué (mg/kg)	Apport au sol pour un traitement à 0,01 % (mg/kg)
Cd	0,05 – 0,45	0,2	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Cr	10 – 90	15	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Cu	2 – 20	1,1	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Ni	2 – 60	85	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Pb	9 – 50	33	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Zn	10 – 100	125	$1,3 \cdot 10^{-2}$

Les données obtenues sur l'ISS peuvent être complétées par l'étude de différentes publications. Certains produits proches de l'ISS ont été brevetés. Le brevet numéro US5000789 (Merritt, 1991) donne un exemple de composition (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Exemple de formulation d'un produit non traditionnel acide (Merritt, 1991).

Constituant	Quantité massique (%)
Solution aqueuse d'acide sulfurique	85
Citrus stripper oil	8
Tensioactif (Nonylphenol polyéthylène glycol)	6
Agent anti-corrosion (1,3-diethylurea)	1

La présence supposée de produits tensioactifs dans la formulation de l'ISS et dans la formulation proposée par Merritt devrait conduire à modifier la tension superficielle de l'eau. Cependant, à la concentration de 1,0 g/L, la tension superficielle mesurée est de 72 mN/m au lieu de 73 mN/m pour l'eau distillée seule ce qui signifie que l'ISS n'a pas de propriété tensioactive. Ce résultat soulève la question de la concentration réelle de SDS d'autant plus que la quantité de sodium contenue dans le produit est faible (6,0 mg/kg, soit $2,6 \cdot 10^{-4}$ mol/kg). Dans l'hypothèse où la totalité du sodium contenu dans l'ISS est issue du SDS ($C_{12}H_{25}SO_4Na$), alors ce composé devrait être présent à hauteur de 75 mg/kg. De ce fait, la formulation de l'ISS utilisé dans ce projet ne contient vraisemblablement que très peu, voire pas du tout de SDS contrairement à ce qui a été annoncé par le fournisseur.

II.3.3 Produit enzymatique

La solution enzymatique étudiée est nommée Permazyme 11X. Le produit est fourni par la société Swietelsky basée en Autriche qui l'importe des États-Unis où il est fabriqué par l'entreprise « International Enzymes Inc. » basée à Las Vegas. Le

produit se présente sous la forme d'une solution aqueuse brune miscible dans l'eau (Figure II.7).

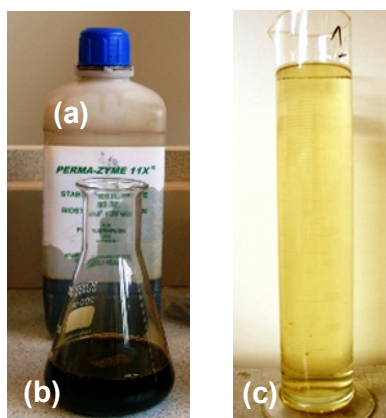


Figure II.7 : Récipient ayant servi à la conservation de la Permazyme (a), aspect de la solution concentrée (b) et diluée à 1,0 g/L (c).

La fiche de données de sécurité mentionne certaines propriétés physico-chimiques (Tableau II.4).

Tableau II.4: Caractéristiques physico-chimiques de la Permazyme 11X.

Point d'ébullition (°C)	100
Point de congélation (°C)	< - 22
Masse volumique à 25°C (Mg/m ³)	1,070
pH (20°C)	4,64

La quantité de matière sèche a été estimée par étuvage à 60°C et correspond à 60 % de la masse du produit.

La mesure de la composition élémentaire de la Permazyme indique la présence de 8349 mg/kg de potassium, élément le plus abondant avant le rubidium (3465 mg/kg) et le calcium (1271 mg/kg). Quelques éléments métalliques toxiques sont également présents à des teneurs supérieures à 1 mg/kg (Cd, Cr, Pb, Zn par exemple).

Tableau II.5 : Composition élémentaire de la Permazyme déterminée par ICP-MS.

Élément	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	K	Mg
Teneur (mg/kg)	16	1271	1,5	31	69	17	30	33,9	1,4	8349	864
Élément	Mn	Na	Ni	Pb	Rb	Si	Sr	U	V	Y	Zn
Teneur (mg/kg)	8,7	600	43	8,8	3465	22	149	95,7	20,8	2,9	547
Teneur <1 mg/kg	Al, Be, Bi, Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, In, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Th, Tm, Yb										

Les teneurs en éléments traces métalliques mesurées dans la Permazyme non diluée sont proches des valeurs observées dans les sols agricoles français (Tableau II.6). Au dosage de 0,002 %, la dilution du produit est telle que l'apport d'éléments métalliques toxiques est négligeable.

Tableau II.6 : Comparaison des teneurs en éléments traces toxiques dans la Permazyme et dans les sols agricoles français.

Élément	Teneurs dans les sols agricoles français (Baize <i>et al.</i> 2007)	Teneur dans la Permazyme non diluée (mg/kg)	Apport au sol lors d'un traitement à 0,002 % (mg/kg)
Cd	0,05 – 0,45	1,5	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Cr	10 – 90	69	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Cu	2 – 20	30	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Ni	2 – 60	43	$8,6 \cdot 10^{-4}$
Pb	9 – 50	8,8	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Zn	10 – 100	547	$1,1 \cdot 10^{-2}$

Au-delà des informations recueillies dans la fiche de données de sécurité et lors de l'étude de la composition élémentaire du produit, la composition de la Permazyme n'est pas connue. En effet, le fournisseur ne communique pas la nature des composés constitutifs du produit, seule la mention « élaboré à partir de mélasse » est portée sur le flacon.

Les mélasses sont des sous-produits résultant de l'extraction du sucre à partir de betteraves ou cannes à sucre. Elles se présentent sous forme d'une substance visqueuse à partir de laquelle le sucre ne peut plus être extrait par cristallisation malgré des teneurs comprises entre 59 et 70 % de la masse de matière sèche (Comité National des Coproduits (8), 2003). Du fait de leur richesse en sucres, les mélasses sont valorisées dans la production de levures boulangères, d'éthanol ou encore d'acide citrique (Trocon & Demarquilly, 1989). Le résidu de fermentation des mélasses est désigné par le terme de vinasse. Il s'agit de solutions riches en matière organique azotée ayant une charge minérale élevée dont l'élément majeur est le potassium (Gautheyron & Turenne, 1978). Par ailleurs, elles contiennent en moyenne 15 % d'acides aminés, monomères de base des protéines (Comité National des Coproduits (10), 2003).

Du fait de sa teneur élevée en potassium et de la présence de protéines, il est vraisemblable que la Permazyme soit en partie composée de vinasses de mélasses.

Les informations disponibles sur la composition de la Permazyme peuvent être complétées par des données mentionnant la composition d'une solution enzymatique nommée EarthZyme dont la composition est proche de la Permazyme (Tableau II.7).

Tableau II.7 : Composition déclarée de la solution enzymatique EarthZyme.

Constituant	Quantité massique (%)
Eau	21
Tensioactifs non ioniques	55
Sucres	18
Acide lactique	3,5
Chlorure de potassium	1,2
Sulfate de magnésium	1,2

Le détail de la composition du produit EarthZyme montre que les tensioactifs représentent plus de 50 % de la masse du produit. Ces composés pourraient également être présents dans la formulation de la Permazyme. Dans ce cas, la mesure de la tension superficielle de solutions aqueuses de Permazyme permettrait d'apporter des éléments de réponse. Les résultats des essais ont effectivement confirmé une réduction de la tension superficielle de l'eau après ajout de Permazyme. À la concentration de 1,0 g/L, la tension superficielle de la solution est de 29 mN/m au lieu de 73 mN/m pour l'eau distillée seule, témoignant du pouvoir tensioactif du produit.

II.3.4 Lignosulfonate de calcium

Le lignosulfonate de calcium utilisé est commercialisé sous le nom de Borresperse par la société Borregard Ligno Tech (usine de Karlsruhe, Allemagne) dont la production en 2010 s'est élevée à 150 000 t (Modahl & Vold, 2011). Les lignosulfonates de calcium sont référencés au Chemical Abstracts Service (CAS) sous le numéro 8061-52-7. Le lignosulfonate se présente sous forme d'une poudre brune faiblement inflammable (Figure II.8). Les poussières de lignosulfonate en suspension dans l'air possèdent de ce fait une aptitude faible à l'explosion d'après la fiche de données de sécurité.



Figure II.8 : Aspect du lignosulfonate de calcium en poudre.

Les caractéristiques communiquées par le fournisseur sont regroupées dans le tableau suivant (Tableau II.8).

Tableau II.8 : Caractéristiques physico-chimiques du lignosulfonate de calcium.

Point de fusion	130°C (décomposition)
Masse volumique (Mg/m ³)	0,500
pH (dilué à 10 g/L dans l'eau à 20°C)	4,4
Solubilité dans l'eau (g/L)	600
Insolubles (%)	0,4
Masse volumique des grains (Mg/m ³)	1,36 +/- 0,02

La teneur en eau du produit est estimée à 8 %, la matière sèche est composée de 93 % de lignosulfonates et d'environ 7 % de sucres réducteurs liés de façon covalente aux lignosulfonates.

La caractérisation de la composition élémentaire du produit effectuée par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) révèle la présence de calcium comme élément majeur (Tableau II.9). L'essentiel de la masse du produit étant composé de matière organique, la valeur de la perte au feu représente environ 86 % de la masse totale. La teneur en soufre s'élève quant à elle à 5,7 %.

Tableau II.9 : Résultats des analyses chimiques élémentaires du lignosulfonate de calcium.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO
% massique	0,95	0,16	0,08	0,03	0,20	5,50
Oxydes	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF*	Total
% massique	0,90	0,20	0,01	<L.D.	86,39	94,43

* PF : Perte au feu par calcination à 1000°C, erreur sur la perte au feu : 15%

<L.D. teneur inférieure à la limite de détermination

Le lignosulfonate est biodégradable avec un taux de dégradation supérieur à 70 % (méthode Zahn-Wellens DIN EN ISO 9888 :1999). Les tests de toxicité ont, par ailleurs, révélé une absence de toxicité pour les organismes vivants.

Enfin, les mesures de tension superficielle effectuées sur des solutions aqueuses de lignosulfonate mettent en évidence les propriétés tensioactives du produit. Pour une concentration de 1,0 g/L, la tension superficielle de la solution est de 55 mN/m au lieu de 73 mN/m pour l'eau distillée seule.

II.3.5 Caractéristiques des produits testés

Les principales caractéristiques des produits de traitement étudiés au cours de la thèse montrent qu'ils sont de nature variée (Tableau II.10). Les principaux composés contenus dans chacun des produits sont rapportés mais les teneurs de chacun

d'entre eux ne sont pas nécessairement connues. La présence de tensioactifs dans la composition de l'ISS est notamment sujette à question.

Tableau II.10 : Synthèse des principales propriétés des produits de traitement non traditionnels étudiés.

Caractéristique	ISS	Permazyme	Lignosulfonate
État	Liquide	Liquide	Solide
Masse volumique (Mg/m ³)	1,15	1,07	0,50
pH	2,4 (1 g/L)	4,6	4,4 (10 g/L)
Matière sèche (%)	30	60	92
Principaux composés	Acide sulfurique, eau, limonène sulfonaté	Tensioactif, eau, matière organique dérivant de mélasses	Lignosulfonates, sucres, eau

II.4 Caractéristiques des sols non traités

La préparation, la conservation et les principales caractéristiques d'identification des quatre sols étudiés sont détaillées dans les paragraphes suivants.

II.4.1 Limon de Moussy

Le limon a été prélevé à la pelle mécanique en région parisienne à proximité de l'aéroport Roissy Charles de Gaulle. Les étapes de préparation du matériau se sont déroulées au Laboratoire Environnement et Minéralurgie (LEM) à Nancy. Après une période de 48 heures en étuve à 60°C, le sol est broyé dans un concasseur à marteaux avant d'être tamisé à 2 mm. L'homogénéisation est effectuée par quartage puis le matériau est stocké en fûts hermétiquement fermés. À l'issue de ces opérations, la teneur en eau du sol est voisine de 2 %. Avant utilisation, un séchage à 60°C permet de retirer l'eau résiduelle. Le sol ainsi préparé présente un passant de 87 % à 80 µm (Figure II.9). La fraction inférieure à 400 µm est caractérisée par une limite de liquidité de 34 % et un indice de plasticité de 14 (Tableau II.11). Ainsi, selon la classification du GTR, le limon entre dans la catégorie A2.

Tableau II.11 : Principales caractéristiques d'identification du limon.

Caractéristique	Valeur
D_{max} (mm)	2,0
Passant à 80 μm (%)	87
Passant à 2 μm (%)	19
Valeur au bleu de méthylène (g/100 g)	3,1
Limite de plasticité (%)	20
Limite de liquidité (%)	34
Indice de plasticité	14
Masse volumique des grains (Mg/m^3)	2,68
pH	9,2
Classification GTR	A2

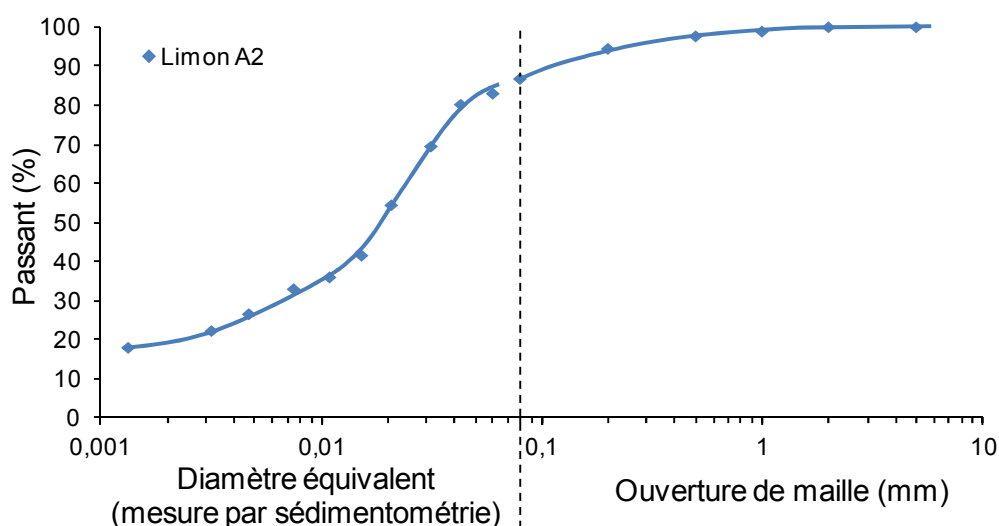


Figure II.9 : Courbe granulométrique du limon obtenue par tamisage par voie humide (diamètres > 80 μm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 μm).

L'identification des minéraux constitutifs du limon par diffraction des rayons X met en évidence la présence de quartz et de calcite accompagnés d'un ensemble de minéraux argileux. Des traces de feldspaths ont également été relevées. L'analyse de la fraction inférieure à 2 μm permet d'identifier les familles de minéraux argileux présents (illite, chlorite, kaolinite et smectites). La teneur en carbonate de calcium précisée par calcimétrie (NF P 94-048, AFNOR 1996) s'élève à 8,3 %. Ces résultats ont été complétés par des analyses chimiques élémentaires effectuées par ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy) selon la procédure décrite dans Carignan *et al.* (2001) au CRPG à Nancy (Tableau II.12).

Tableau II.12 : Résultats des analyses chimiques élémentaires du limon.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO
% massique	69,16	8,20	3,52	0,06	0,81	5,93
Oxydes	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF*	Total
% massique	0,60	1,62	0,69	0,09	9,05	99,73

* PF : Perte au feu par calcination à 1000°C

Les dosages du soufre et du carbone ont montré que le sol présente une teneur très faible en soufre (0,02 %) et en carbone organique (0,15 %), quant à l'eau adsorbée et de constitution, non évaporée par étuvage à 105°C, elle représente 2,3 % de la masse du sol (Tableau II.13).

Tableau II.13 : Résultats des analyses chimiques spécifiques du limon.

Élément	S _{tot}	CO ₂ tot	C _{organique}	H ₂ O
% massique	0,02	4,85	0,15	2,28

Les caractéristiques mécaniques du limon servent de référence pour déterminer les effets des traitements. Les courbes de compactage Proctor et d'indice portant immédiat (Figure II.10) permettent de définir quatre grandeurs : la teneur en eau optimale de compactage (w_{OPN}), la masse volumique sèche maximale (ρ_{dOPN}), la valeur à l'optimum de compactage (IPI_{OPN}) et la valeur maximale de portance (IPI_{max}) valant respectivement 15 et 28 (Tableau II.14).

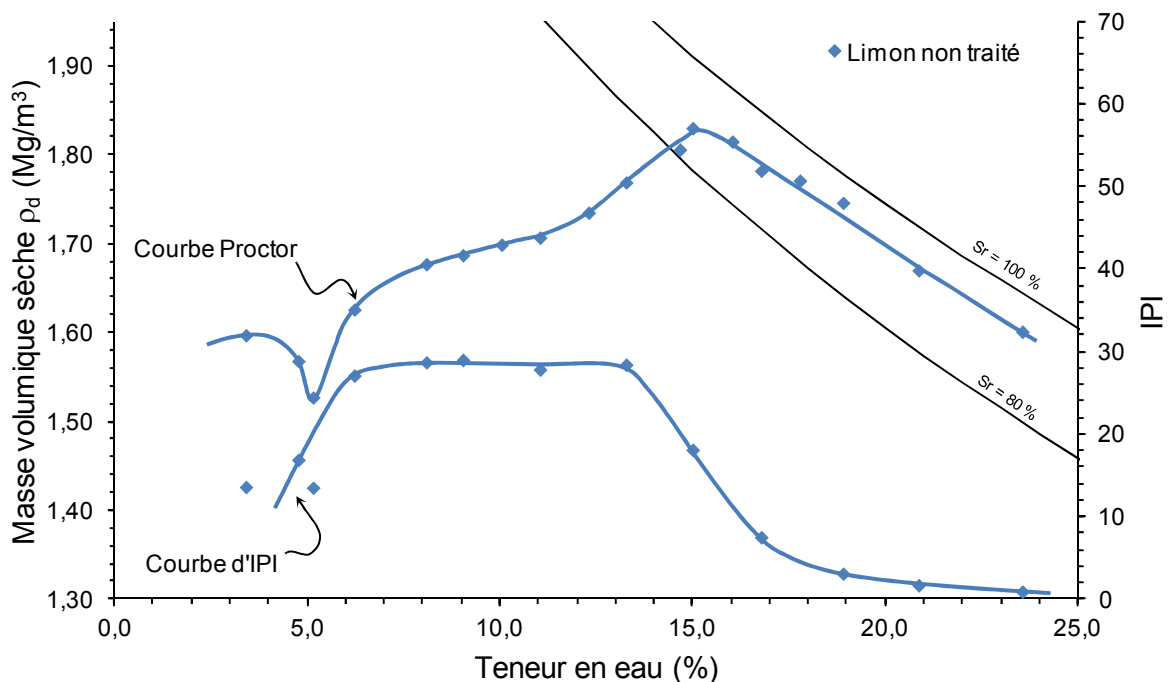


Figure II.10 : Courbes de compactage et de portance du limon non traité.

D'autres caractéristiques sont déterminées à l'optimum de compactage (Tableau II.14) telles la résistance à la compression simple (0,46 MPa), l'indice CBRi désignant la valeur CBR du sol après 4 jours d'immersion et le coefficient de conductivité hydraulique k ($4,0 \cdot 10^{-8}$ m/s).

Tableau II.14 : Principales caractéristiques géotechniques du limon.

Caractéristique	Valeur
W_{OPN} (%)	15,5
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82
IPI_{OPN}	15
IPI_{max}	28
CBRi	8,8
Rc (MPa)	0,46
k (m/s)	$4,0 \cdot 10^{-8}$
$\Delta H/H_0$ (%)	1,7

L'étude de la microstructure du sol permet de visualiser l'organisation du limon avant traitement. Des clichés sont pris à différents grossissements, compris entre 350 et 3500 fois. À faible grossissement, le sol se présente sous forme d'une association entre des grains essentiellement de quartz recouverts par des minéraux argileux formant une couverture quasi continue à leur surface (Figure II.11). Les grains à proprement parler, ne sont visibles qu'à la faveur d'une rupture de ce recouvrement de minéraux argileux (flèches sur la Figure II.11b). La différence de nuances de gris entre les deux photos correspond à une modification du réglage du contraste.

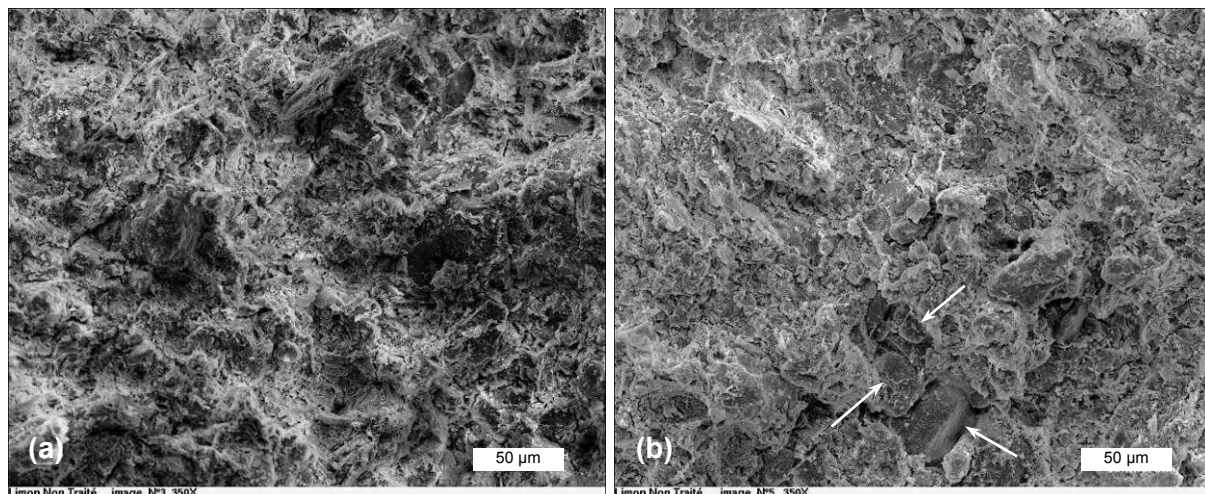


Figure II.11 : Images MEB du limon non traité, vue d'ensemble.

Les clichés pris au grossissement de 3500 fois montrent des aspects très divers en fonction de la zone observée (Figure II.13). En effet, à ce grossissement, un grain peut par exemple occuper l'ensemble du champ photographié (Figure II.13a). Au

contraire, dans certaines zones, seules des plaquettes de minéraux argileux sont visibles. Elles présentent alors des formes rectangulaires à sub-arrondies de 1 à 5 μm de diamètres (flèches sur la Figure II.13b). Entre ces deux clichés extrêmes, certaines zones montrent des associations de grains et de minéraux argileux en proportions variables (Figure II.13c et d). Toutefois, quelle que soit la région observée, les mêmes associations minérales et morphologies sont rencontrées.

Entre les minéraux peuvent être observés toute une variété de pores de tailles diverses (Figure II.13d). Certains font plusieurs micromètres de long (flèches épaisses), d'autres au contraire ne mesurent que quelques fractions de micromètre (flèches fines).

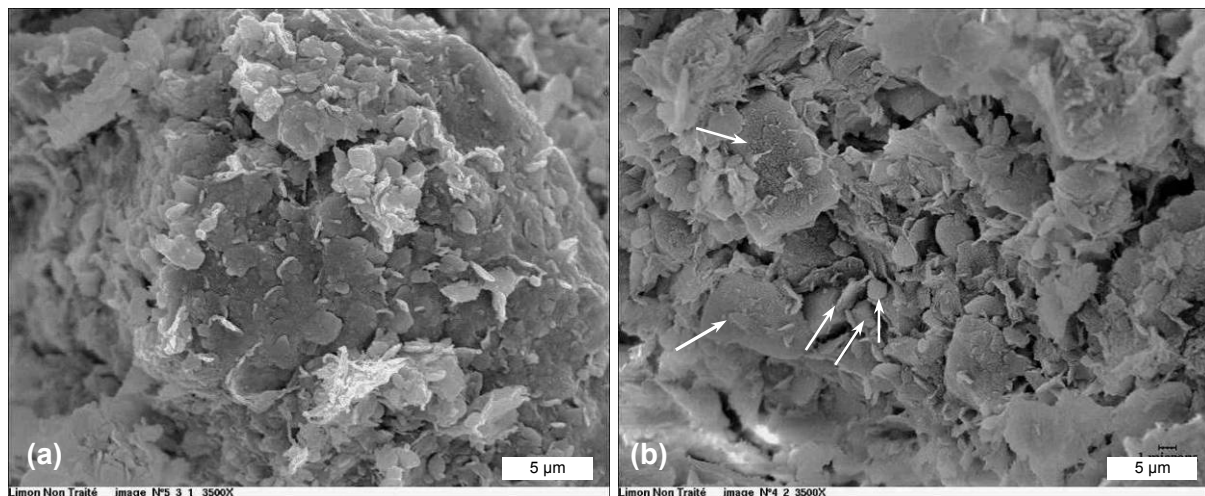


Figure II.12 : Images MEB du limon non traité ; grain de quartz de 30 μm de diamètre recouvert de minéraux argileux (a), zone riche en minéraux argileux (b).

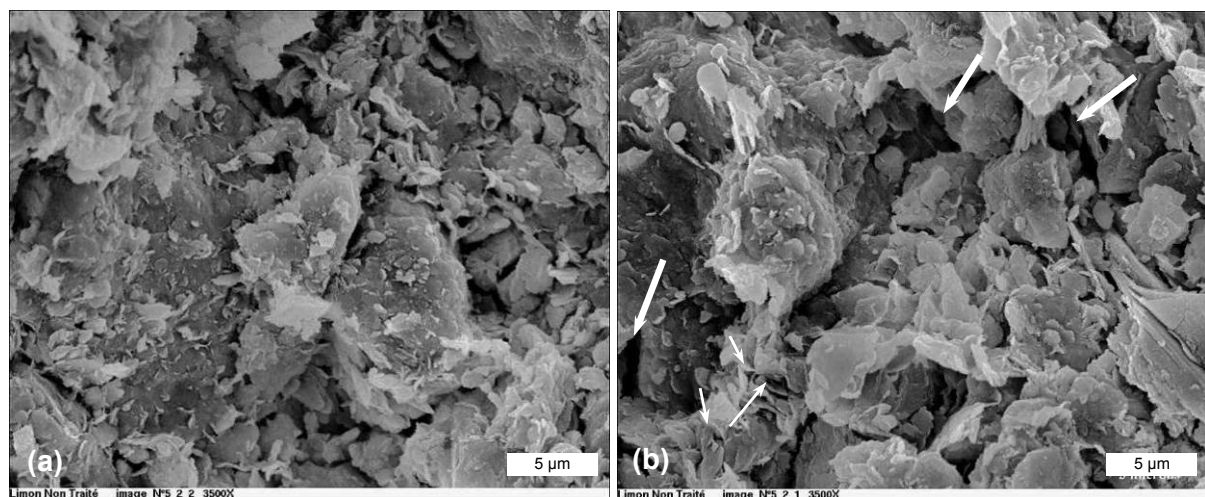


Figure II.13 : Images MEB du limon non traité, association entre minéraux argileux et grains de quartz (a et b) montrant générant différentes tailles de pores (flèche sur la photo b).

L'étude de la répartition des pores du limon effectuée par porosimétrie au mercure renseigne sur la taille des pores présents. Lors de la première injection, un volume de 0,16 cm^3/g est injecté (Figure II.14). Ce volume correspond à un indice des vides investis (e_{inv}) par le mercure de 0,44. L'indice des vides du sol (e_{tot}) étant de 0,47,

l'essentiel des pores a été rempli par le mercure. La distribution des rayons d'entrée des pores au sein du sol est uni-modale avec une fréquence maximale atteinte pour un rayon de 0,6 μm (Figure II.14).

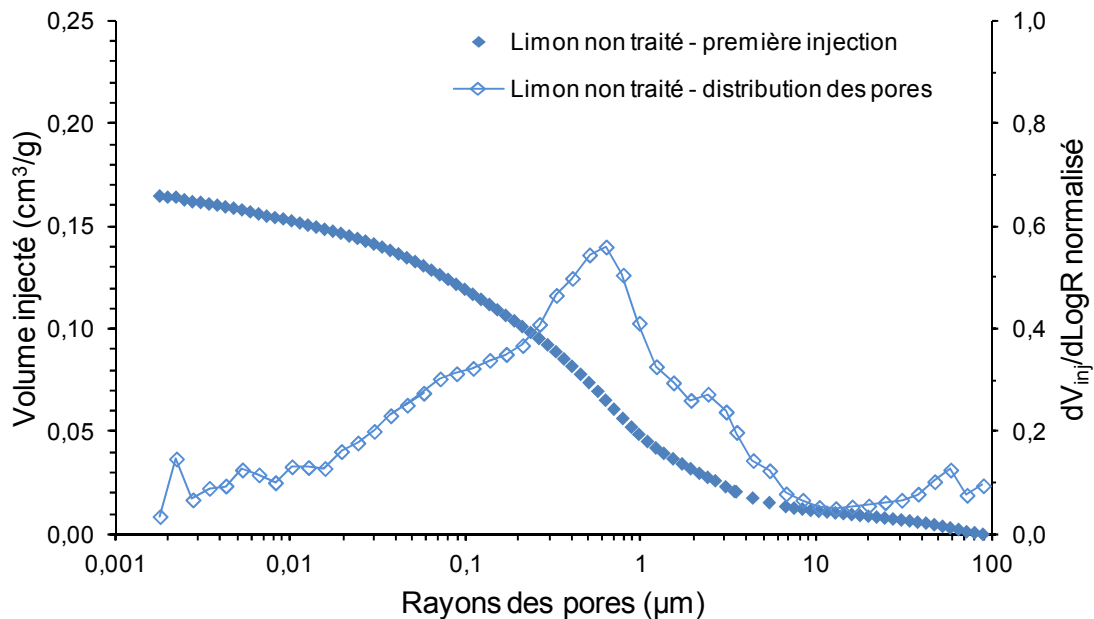


Figure II.14 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon non traité.

II.4.2 Argile de Couthenans

Le sol argileux a été prélevé à proximité de Couthenans puis préparé au LAEGO. Après réduction manuelle de la mouture des mottes et retrait des galets, un séchage partiel à l'air libre a lieu. Une fois la teneur en eau suffisamment réduite pour ne pas encrasser le malaxeur à couteaux, le sol est broyé puis tamisé à 5 mm. Le matériau ainsi préparé est quarté puis stocké dans un fût hermétiquement fermé. Le sol n'est pas totalement séché mais une teneur en eau de 14 % est conservée afin de faciliter sa ré-humidification lors des essais.

Un passant de 98 % à 80 μm (Figure II.15) et un indice de plasticité de 33 (Tableau II.15) font du sol un matériau de la catégorie A3 du GTR.

Tableau II.15 : Principales caractéristiques d'identification de l'argile.

Caractéristique	Valeur
D_{max} (mm)	5,0
Passant à 80 μm (%)	98
Passant à 2 μm (%)	66
Valeur au bleu de méthylène (g/100g)	6,4
Limites de plasticité (%)	27
Limite de liquidité (%)	59
Indice de plasticité	32
Masse volumique des grains (Mg/m^3)	2,68
pH	6,6
Classification GTR	A3

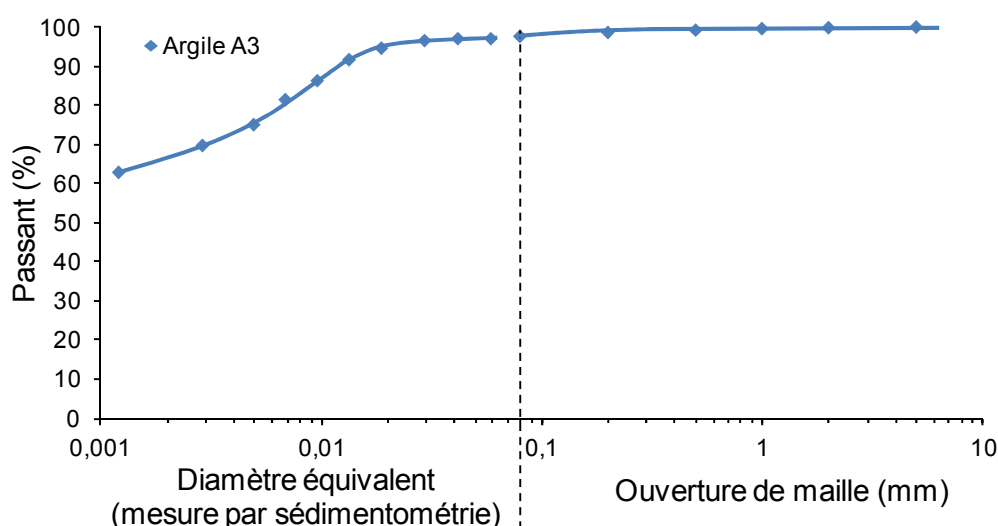


Figure II.15 : Courbe granulométrique de l'argile de Couthenans obtenue par tamisage par voie humide (diamètres > 80 μm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 μm).

L'analyse de la composition du sol par diffraction des rayons X met en évidence la présence de quartz accompagné de divers minéraux argileux (illites, chlorites, kaolinites et smectites). Les analyses n'ont pas révélé la présence de calcite, résultat confirmé par calcimétrie ($\% \text{CaCO}_3 < 0,2 \%$). Ces analyses ont été complétées par des analyses chimiques élémentaires effectuées par ICP-OES (Tableau II.16).

Tableau II.16 : Résultats des analyses chimiques élémentaires de l'argile.

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO
% massique	58,87	18,30	4,10	0,01	1,95	0,54
Oxydes	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF*	Total
% massique	0,33	3,32	0,94	0,06	10,36	99,78

* PF : Perte au feu par calcination à 1000°C

Des analyses chimiques spécifiques ont montré que le sol présente une teneur très faible en soufre (0,01 %) et en carbone organique. L'eau adsorbée et de constitution non évaporée par étuvage à 105°C représente 4,3 % de la masse du sol (Tableau II.17) et le carbone présent dans le sol est essentiellement issu de la matière organique.

Tableau II.17 : Résultats des analyses chimiques spécifiques de l'argile.

Élément	S _{tot}	CO ₂ tot	C _{organique}	H ₂ O
% massique	0,01	0,99	0,23	4,34

Les principales caractéristiques mécaniques de l'argile non traitée ont été déterminées (Tableau II.18). La teneur en eau optimale w_{OPN} est de 22,0 % et la masse volumique sèche maximale de 1,59 Mg/m³ (Figure II.16). L'IPI mesuré à l'optimum de compactage est de 12.

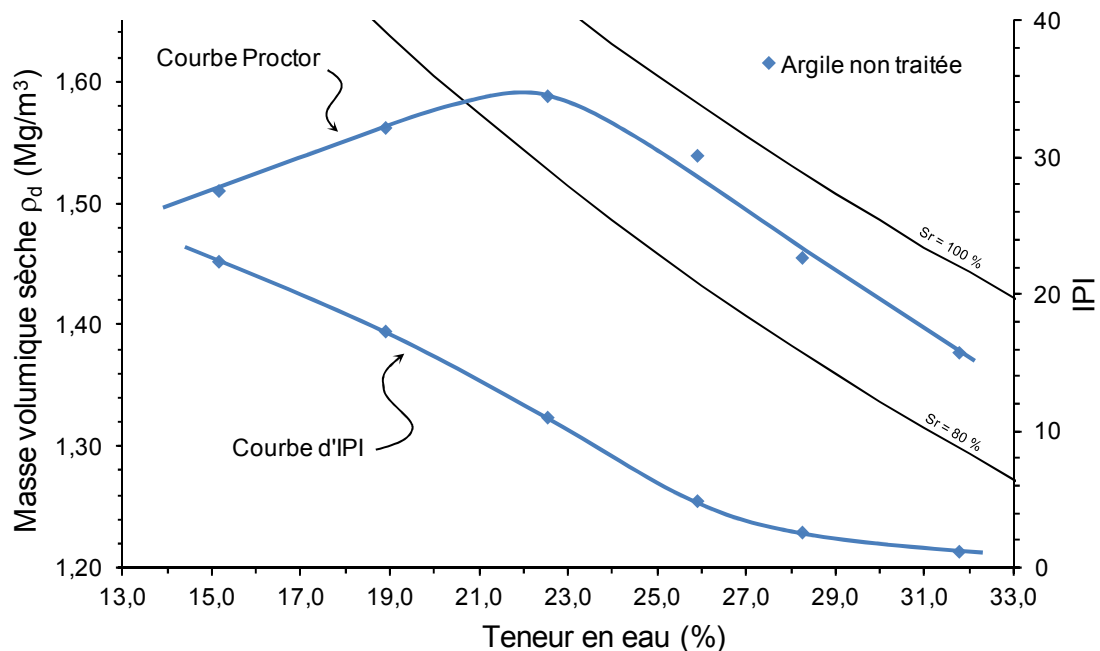


Figure II.16 : Courbes de compactage et de portance de l'argile non traitée.

Tableau II.18 : Principales caractéristiques mécaniques de l'argile.

Caractéristique	Valeur
w_{OPN} (%)	22,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,59
IPI_{OPN}	12
CBRi	0,9
Rc (MPa)	0,39
k (m/s)	$7,5 \cdot 10^{-9}$
$\Delta H/H_0$ (%)	9,4

II.4.3 Sables rhénans

L'effet de certains traitements sur deux sables de classes B5 et D1 a également été étudié. Les sables correspondent à des matériaux extraits d'une gravière exploitant les sables et graviers du Rhin. L'objectif est d'estimer dans quelle mesure des sols non plastiques réagissent aux traitements. De plus, les essais permettront de déterminer si les traitements apportent un intérêt lors de la mise en œuvre d'un sable homométrique dont le réemploi est habituellement problématique.

Des sables de classes B5 n'étant pas directement commercialisés par l'entreprise, l'objectif était de reconstituer un matériau de caractéristiques équivalentes en mélangeant un sable 0/4 à une proportion suffisante de fines récupérées lors des opérations de lavage. Le sable homométrique est obtenu par tamisage du sable 0/4 de façon à concentrer la fraction granulométrique comprise entre 0,2 et 1 mm (Figure II.17). Les principales caractéristiques des matériaux obtenus sont résumées par le Tableau II.19.

Tableau II.19 : Principales caractéristiques d'identification des deux matériaux sableux.

Caractéristique	Sable B5	Sable D1 homométrique
D_{max} (mm)	10	2 mm
Passant à 2 mm (%)	72	100
Passant à 80 μ m (%)	21	1,4
d_{60} (mm)	0,75	0,35
d_{10} (mm)	0,02	0,2
C_u (d_{60}/d_{10})	38	1,8
Valeur au bleu de méthylène (g/100g)	0,3	0,07
Masse volumique des grains (Mg/m ³)	2,67	2,67

La courbe granulométrique du sable B5 est qualifiée d'étalée ($C_U > 2$) alors qu'elle est serrée pour le sable D1 ($C_U < 2$). Le sable D1 est alors qualifié d'homométrique.

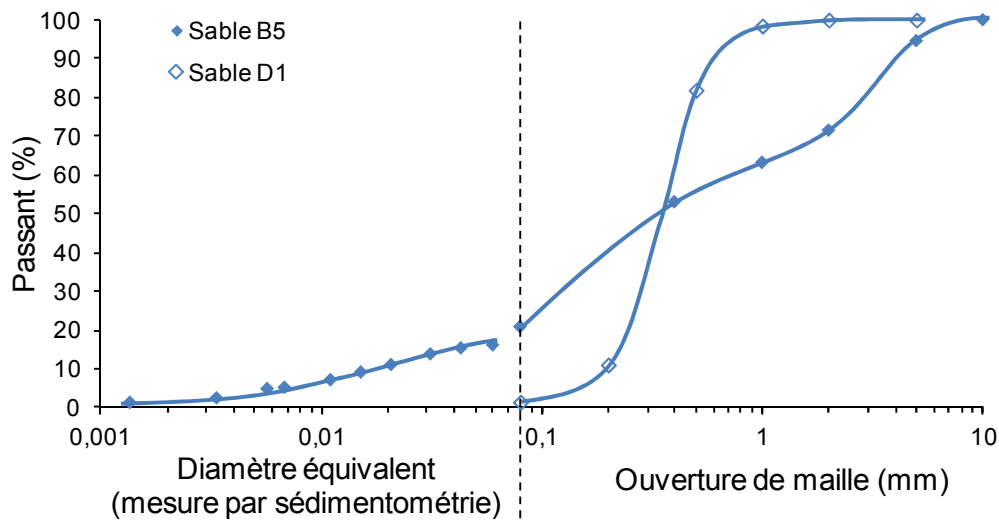


Figure II.17 : Courbes granulométriques des deux matériaux sableux obtenues par tamisage par voie humide (diamètres > 80 μm) et par sédimentométrie (diamètres < 80 μm).

Les courbes de compactage et de portance des deux sables montrent des comportements différents. Le sable B5 présente une bonne aptitude au compactage avec un optimum bien identifié (Figure II.18) alors que la masse volumique sèche du sable homométrique D1 reste voisine de 1,6 Mg/m^3 indépendamment de la teneur en eau de compactage (Figure II.19).

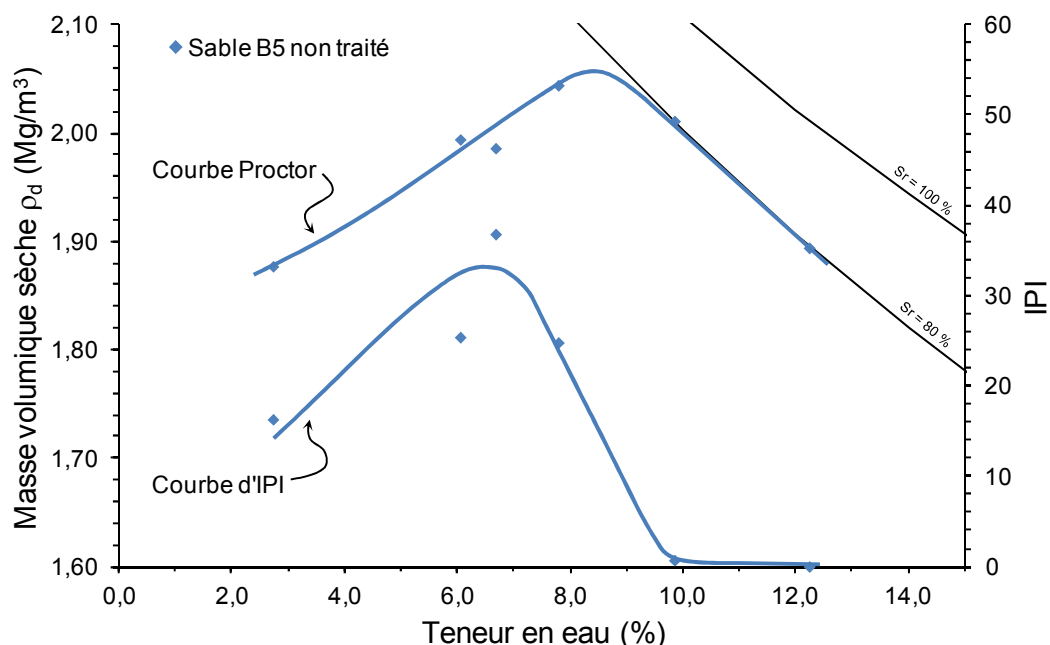


Figure II.18 : Courbes de compactage et de portance du sable B5 non traité.

La courbe d'IPI du sable B5 présente une variabilité importante du fait de la granulométrie étalée du sol. Par ailleurs, la courbe d'IPI montre une variation marquée de la portance pour des teneurs en eau voisines de w_{OPN} (9,0 %). Les IPI

mesurés pour le sable D1 sont inférieurs à 10 pour l'ensemble de la gamme de teneur en eau de compactage.

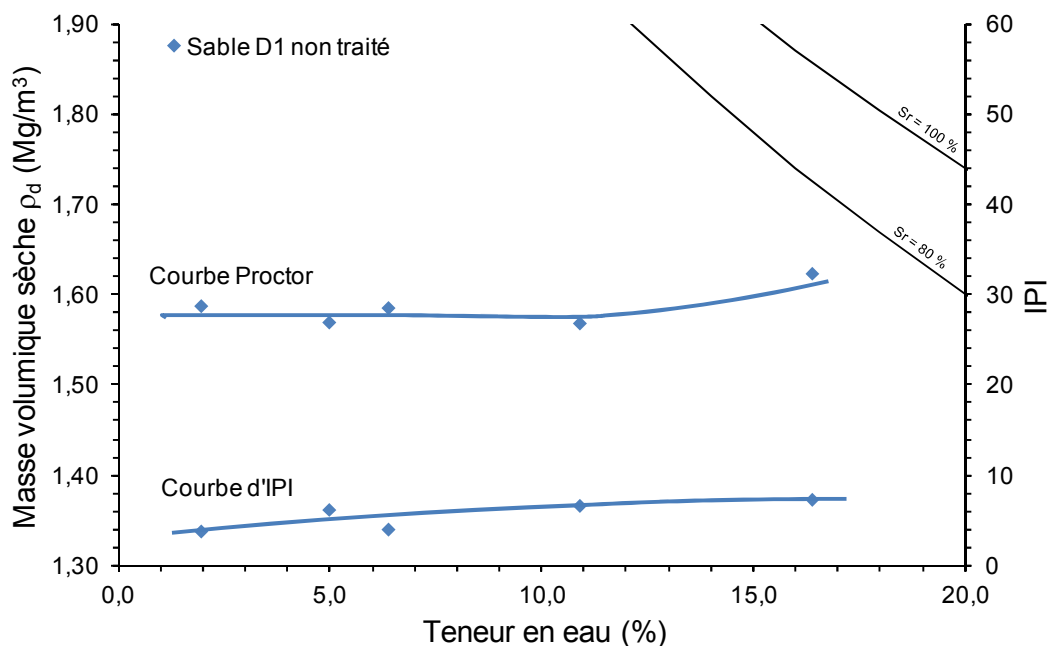


Figure II.19 : Courbes de compactage et de portance du sable D1 non traité.

II.4.4 Synthèse des propriétés géotechniques des sols

Au cours de cette étude, quatre sols ont été sélectionnés pour la réalisation des différents essais (Tableau II.20). Chacun de ces sols appartient à une classe GTR différente ce qui permettra d'avoir un bon aperçu de la réactivité de différents types de sols face aux traitements non traditionnels.

Tableau II.20 : Synthèse des principales caractéristiques géotechniques des quatre sols étudiés.

Caractéristique	Limon A2	Argile A3	Sable B5	Sable D1
D_{max} (mm)	2,0	5,0	10,0	2,0
Passant à 80 μ m (%)	87	98	21	1,4
Passant à 2 μ m (%)	19	66	2	< 1,4
Valeur au bleu de méthylène (g/100 g)	3,1	6,4	0,3	0,07
Limite de plasticité (%)	20	27		
Limite de liquidité (%)	34	59		N.D.
Indice de plasticité	14	32		
W_{OPN} (%)	15,5	22,0	9,0	N.D.
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,59	2,06	N.D.

N.D. : Non Défini

II.5 Caractéristiques des sols traités avec des produits traditionnels

Après une description rapide des protocoles de traitement des sols, les résultats des traitements traditionnels à la chaux et au ciment appliqués au limon et à l'argile sont présentés.

II.5.1 Procédures de traitement

Pour le traitement à la chaux, un dosage courant de 1,5 % est employé. Une chaux vive contenant 94 % d'oxyde de calcium est utilisée, le traitement s'effectue en respectant les étapes suivantes.

- Le sol est mis à une teneur en eau supérieure de 1,5 % à la teneur en eau finale visée afin de compenser le séchage induit par le traitement.
- Une cure de 24 h à 20°C est appliquée. (48 heures pour l'argile)
- La quantité de chaux nécessaire est ajoutée progressivement lors du malaxage.
- Le mélange obtenu est mis au repos durant une heure avant d'être compacté.

Le traitement au ciment a uniquement été étudié pour le limon. Au cours des essais, un ciment CEM I a été appliqué au dosage de 6,0 %.

La procédure employée est la suivante.

- Le sol est mis à teneur en eau puis laissé 24 h en sac hermétique fermé conservé à 20°C. La teneur en eau visée est calculée en prenant en compte de l'ajout de masse sèche due au ciment.
- La quantité de ciment nécessaire est ajoutée progressivement lors du malaxage.
- Le mélange obtenu est mis au repos entre 20 et 30 minutes avant d'être compacté.

II.5.2 Résultats expérimentaux

Les résultats des essais considérant les traitements à la chaux et au ciment sont présentés dans les parties suivantes.

II.5.2.1 Traitement du limon à la chaux

Sont présentés les résultats des essais géotechniques : compactage – portance, résistance à la compression simple, CBR en immersion, indices de plasticité et VBS. Les résultats de l'étude de la microstructure sont également détaillés.

a) Propriétés géotechniques

L'ajout de chaux au limon conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale de compactage et à une réduction de la masse volumique sèche maximale (Figure II.20). La masse volumique sèche de l'optimum Proctor passe de 1,82 à 1,70 Mg/m³ et la teneur en eau à l'optimum augmente de 15,5 à 18,0 %. À l'optimum de compactage, l'IPI augmente de 15 à 23 après traitement, quant à la valeur maximale atteinte, celle-ci n'est que très légèrement modifiée (Tableau II.21).

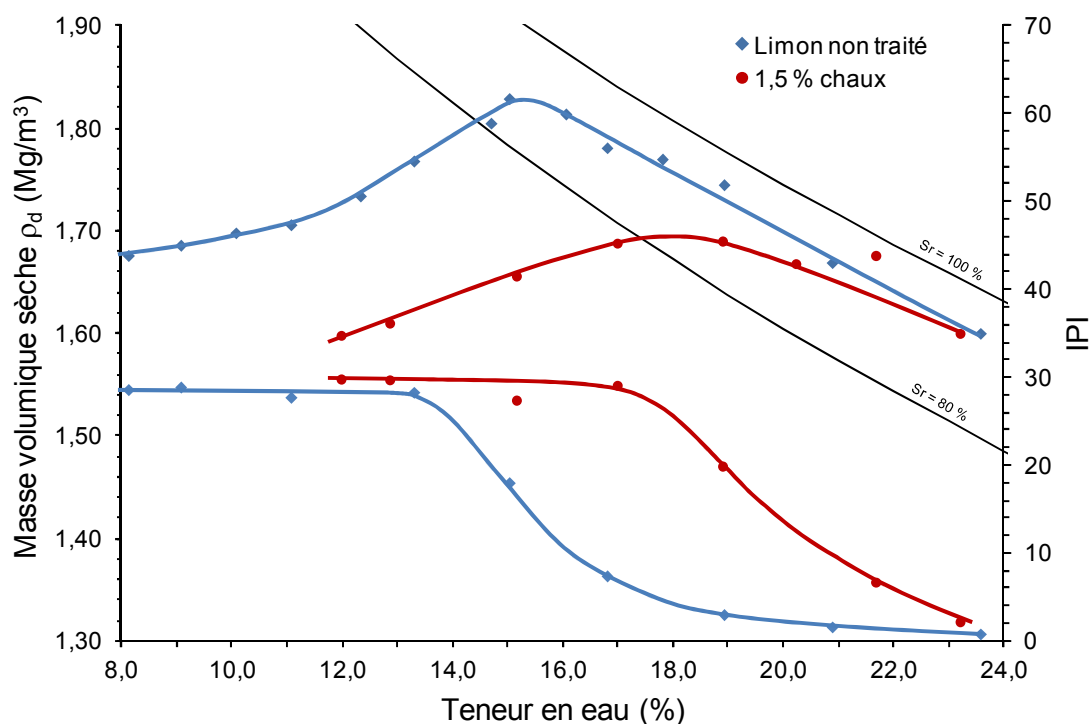


Figure II.20 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 1,5 % de chaux vive.

Tableau II.21 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 1,5 % de chaux vive.

Caractéristique	Non traité	1,5 % chaux
W_{OPN} (%)	15,5	18,5
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,70
IPI_{OPN}	15	23
IPI_{max}	29	30

La mesure de l'indice CBR après 4 jours d'immersion indique une nette amélioration de la portance par rapport au sol non traité (Tableau II.22). Par ailleurs, la valeur

mesurée est supérieure à l'indice IPI témoignant d'une amélioration de la portance suite à l'immersion. La valeur de gonflement relevée est faible (0,6 %).

Tableau II.22 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du limon traité à la chaux.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	8,8	0,42	1,0
1,5 % chaux	16,4	1,24	0,6

La résistance à la compression simple du sol traité à la chaux augmente au cours du temps. Au bout de 28 jours de cure, sa valeur a doublé par rapport à la résistance à la compression simple du sol non traité (Figure II.21).

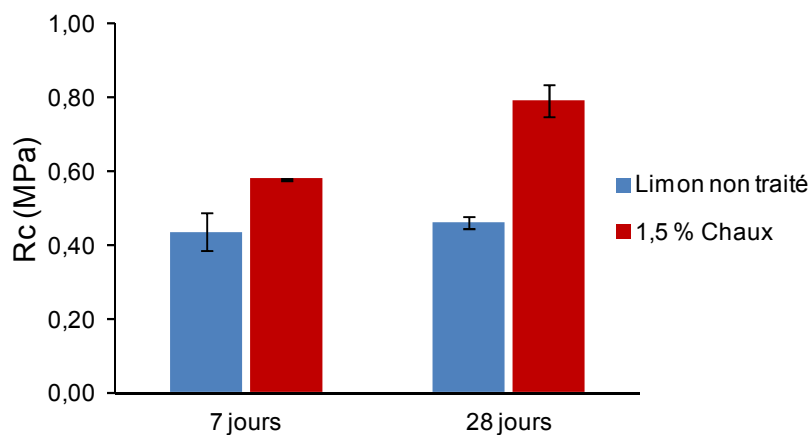


Figure II.21 : Résistance à la compression simple du limon traité à 1,5 % de chaux après 7 et 28 jours de cure.

Les caractéristiques d'identification ont également été modifiées par le traitement. La valeur au bleu de méthylène passe de 3,0 à 0,9 g/100g de sol sec entre 7 et 28 jours de cure. La limite de plasticité du limon augmente de 20 % à 28 %. De même, la limite de liquidité augmente de 34 % à 42 %. Les limites d'Atterberg sont modifiées dans le sens d'un déplacement du domaine plastique vers les teneurs en eau plus élevées sans que son étendue ne soit modifiée (Figure III.46). L'indice de plasticité du sol reste donc égal à 14. Par ailleurs, le pH devient fortement alcalin et s'établit à 12,4.

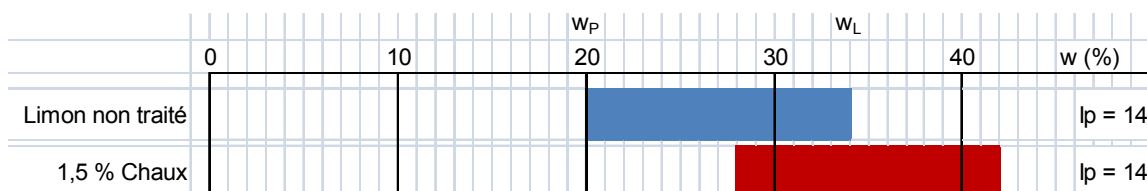


Figure II.22 : Indices de plasticité du limon traité à 1,5 % de chaux.

b) Étude de la microstructure

Le limon non traité montre en imagerie MEB, une structure présentant des grains de quartz (Q), dont les arrêtes sont soulignées par un trait en pointillé (Figure II.23a), associés à des minéraux argileux (flèches) dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs microns. Aucune orientation préférentielle des minéraux argileux n'est observée.

Après traitement à 1,5 % de chaux, la microstructure du sol est modifiée (Figure II.23b). Les grains de quartz sont dégagés de leur couverture argileuse et les minéraux argileux se trouvent fragmentés et regroupés dans des agrégats désignés par des flèches. Contrairement au sol non traité aucune grande plaquette d'argile n'est observée.

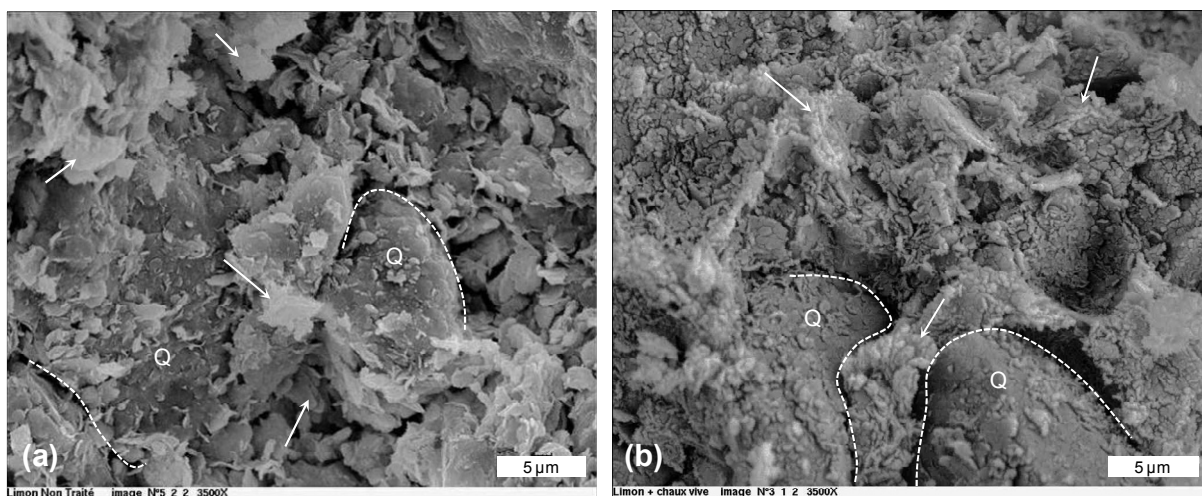


Figure II.23 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 1,5 % de chaux (b).

La porosité du matériau traité est modifiée comme en témoigne la quantité supplémentaire de mercure injectée dans l'échantillon traité à la chaux ($0,21 \text{ cm}^3/\text{g}$ au lieu de $0,16 \text{ cm}^3/\text{g}$). L'augmentation du volume injecté est liée au fait que l'indice des vides de l'éprouvette traitée soit plus grand ($0,58$ au lieu de $0,47$). La répartition des pores dans le sol est également affectée comme en témoignent les courbes de porosimétrie avec la formation d'une macroporosité caractérisée par un surplus de pores de diamètres compris entre 4 et $10 \mu\text{m}$ et un développement de la microporosité entre $0,03$ et $0,3 \mu\text{m}$ (Figure II.24). Le volume correspondant aux pores intermédiaires ($0,3$ à $4 \mu\text{m}$) est réduit, quant aux pores de diamètres supérieurs à $10 \mu\text{m}$ ou inférieurs à $0,03 \mu\text{m}$, leurs caractéristiques ne sont pas modifiées.

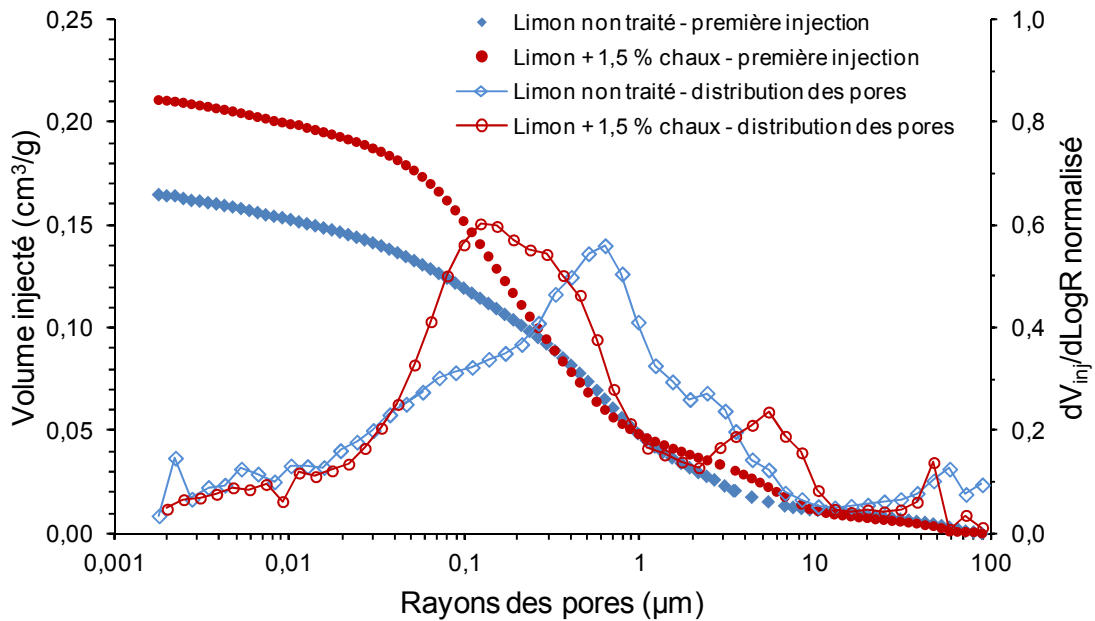


Figure II.24 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 1,5 % de chaux.

II.5.2.2 Traitement de l'argile à la chaux

Le traitement de l'argile à 1,5 % de chaux conduit à une modification de la courbe de portance allant dans le sens d'une augmentation de la teneur en eau optimale et d'une réduction de la masse volumique sèche maximale (Figure II.25). La portance du sol traité est améliorée en particulier pour les teneurs en eau élevées. À l'optimum, un IPI de 16 est mesuré au lieu de 12 pour le sol non traité (Figure II.25, Tableau II.23).

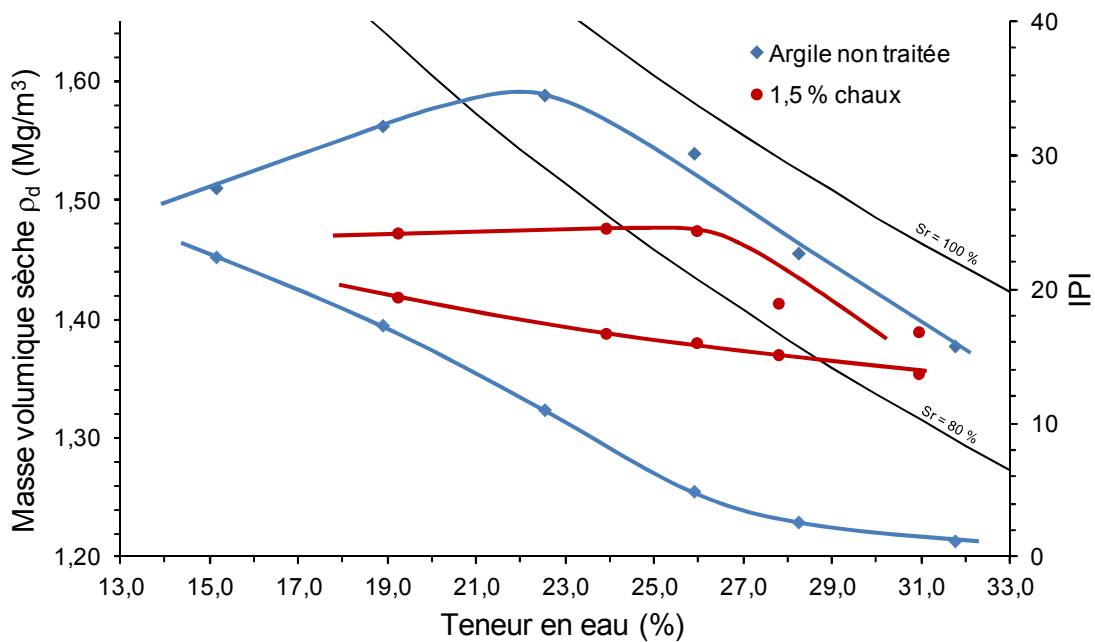


Figure II.25 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à 1,5 % de chaux.

Tableau II.23 : Caractéristiques de compactage et de portance de l'argile traitée à 1,5 % de chaux.

Caractéristique	Non traité	1,5 % chaux
W_{OPN} (%)	22,0	26,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,59	1,48
IPI_{OPN}	12	16

Lors des essais en immersion, l'indice CBRi du sol traité à la chaux est amélioré par rapport à la valeur mesurée pour le sol non traité (Tableau II.24). Le traitement réduit également le gonflement observé sur quatre jours.

Tableau II.24 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion de l'argile traitée à la chaux.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	0,9	0,1	3,7
1,5 % chaux	13,6	0,8	2,4

La résistance à la compression simple du sol traité à la chaux augmente au cours du temps (Figure II.26), au bout de 28 jours de cure la résistance est environ doublée par rapport au sol non traité.

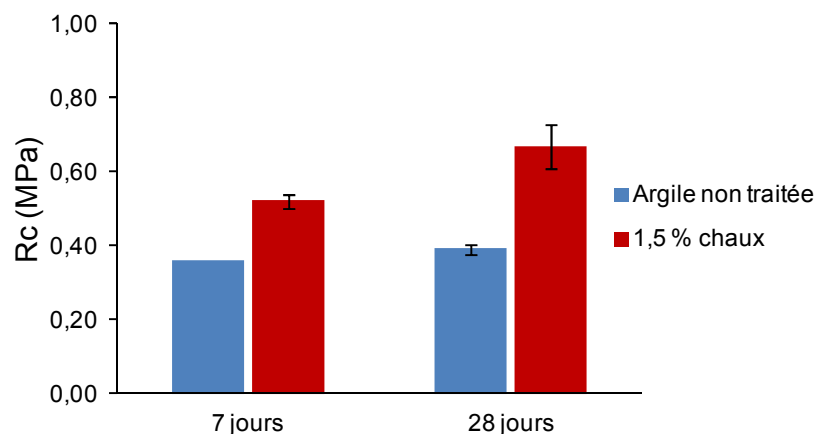


Figure II.26 : Résistance à la compression simple de l'argile traitée à 1,5 % de chaux après 7 et 28 jours de cure.

Les caractéristiques d'identification du sol ont été modifiées par l'ajout de chaux. La valeur au bleu de méthylène est réduite suite au traitement et diminue avec le temps en passant de 3,1 à 2,0 g/100g entre 7 et 28 jours de cure contre 6,4 g/100g en moyenne pour le sol non traité. Les limites de liquidité et de plasticité du sol augmentent induisant une hausse de l'indice de plasticité ($I_p = 49$ au lieu de 32) (Figure II.27).

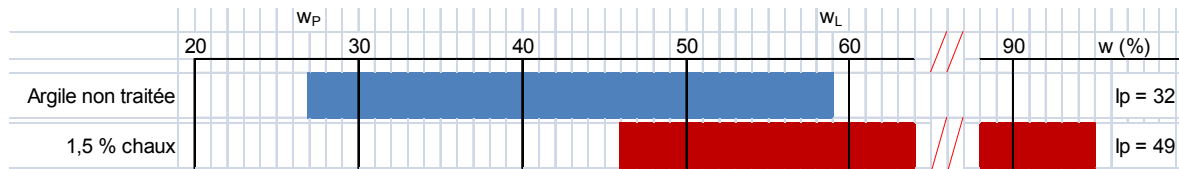


Figure II.27 : Indices de plasticité de l'argile traitée à 1,5 % de chaux.

II.5.2.3 Traitement du limon au ciment

Le traitement du limon au ciment CEM I a été entrepris dans le but de comparer ses effets avec un traitement mixte : ciment plus produit non traditionnel. Pour le traitement au ciment seul, les propriétés de compactage (Figure II.28), et de résistance à la compression simple (Figure II.29) servent de références.

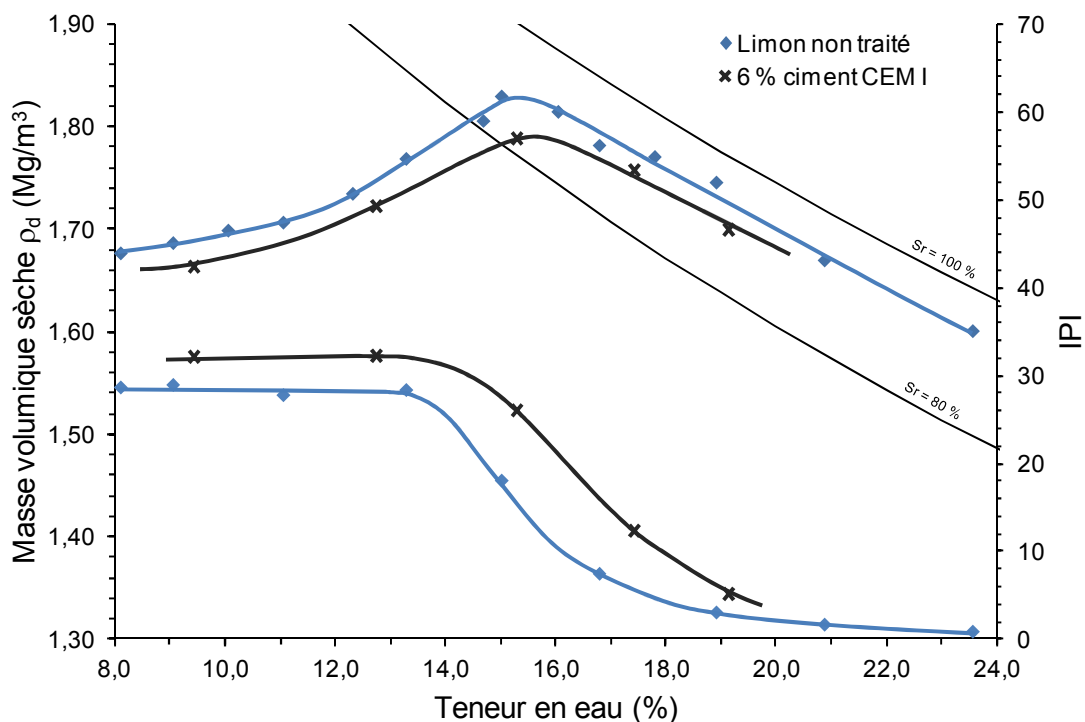


Figure II.28 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment.

L'ajout de ciment réduit la masse volumique sèche et améliore l'IPI sur l'ensemble de la courbe Proctor. À l'optimum, la masse volumique sèche est réduite de $1,82 \text{ Mg/m}^3$ à $1,79 \text{ Mg/m}^3$ et l'IPI augmente de 15 à 24 (Tableau II.25).

Tableau II.25 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment CEM I.

Caractéristique	Non traité	6 % ciment
W_{OPN} (%)	15,5	15,5
ρ_{dOPN} (Mg/m^3)	1,82	1,79
IPI_{OPN}	15	24
IPI_{max}	29	32

Au cours du temps, la résistance à la compression simple des éprouvettes augmente pour atteindre des valeurs voisines de 5 MPa après 90 jours de cure (Figure II.29).

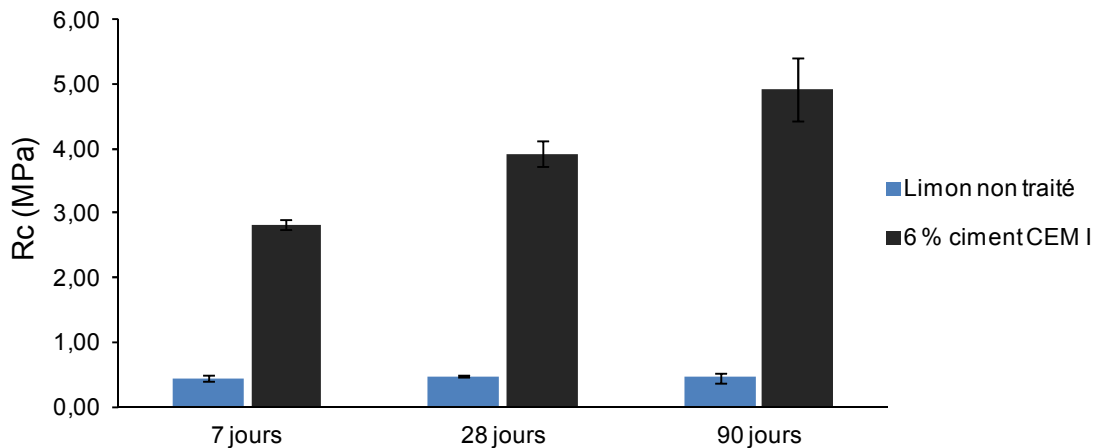


Figure II.29 : Résistance à la compression simple du limon traité à 6 % de ciment CEM I entre 7 et 90 jours de cure.

II.5.3 Synthèse des propriétés géotechniques des sols traités avec des produits traditionnels

Le traitement du limon et de l'argile à la chaux ou au ciment a montré que les propriétés mécaniques des sols étaient modifiées. L'ajout de chaux a par exemple pour effet d'augmenter la teneur en eau optimale de compactage et de réduire la masse volumique sèche maximale des deux sols (Tableau II.26). Au cours du temps, les sols traités voient leur résistance à la compression simple augmenter.

Tableau II.26 : Synthèse des principales caractéristiques mécaniques des sols traités à la chaux et au ciment.

Caractéristique	Limon de Moussy			Argile de Couthenans	
	Non traité	1,5 % chaux	6 % ciment	Non traitée	1,5 % chaux
w_{OPN} (%)	15,5	18,5	15,5	22,0	26,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,70	1,79	1,59	1,48
IPI_{OPN}	15	23	24	12	16
Rc (28 j)	0,5	0,8	3,9	0,4	0,7

II.6 Bilan

Cette partie a permis de présenter l'approche retenue dans cette étude. Les principales caractéristiques des produits de traitement et des sols y sont détaillées. Selon la nature des produits (liquide ou solide) et de leur dosage, des méthodologies de traitement spécifiques sont mises en œuvre. Les traitements à la chaux et au

ciment engendrent une réduction de la masse volumique sèche et une augmentation de la teneur en eau optimale accompagnée de portances plus élevées. L'apport de chaux ou de ciment améliore le comportement mécanique des sols en modifiant leurs caractéristiques intrinsèques (limites d'Atterberg, valeur au bleu). Comme illustré pour le traitement du limon à la chaux, la microstructure du sol est fortement affectée par la formation d'agrégats de minéraux argileux, le développement d'une macroporosité et l'ouverture de micropores.

Les résultats des essais effectués sur les sols non traités serviront de base à l'identification des effets des traitements non traditionnels. Quant aux résultats obtenus sur les sols traités avec des produits traditionnels, ils permettront de mettre en perspective leurs applications potentielles.

Chapitre III :

Effets des traitements non traditionnels sur les propriétés géotechniques des sols : recherche des applications potentielles

III.1 Introduction

La synthèse bibliographique a montré que la définition précise des applications des produits non traditionnels nécessite l'étude du comportement des sols traités. Pour ce faire, l'action de chaque traitement sur les principales propriétés géotechniques des sols doit être déterminée puis en cas de modification, l'influence des conditions de mise en œuvre est à caractériser. L'étude de l'évolution des propriétés mécaniques des sols traités au cours du temps est également nécessaire pour appréhender le comportement à long terme du matériau. Par ailleurs, l'ensemble des données recueillies, complété par des essais spécifiques, doit permettre d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes d'action. Les résultats servent alors à définir l'apport technique et environnemental des traitements pour le réemploi des matériaux de terrassement.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les données factuelles obtenues pour différents sols traités avec trois produits non traditionnels. Pour chaque produit, les résultats sont présentés successivement.

III.2 Traitement avec une solution enzymatique : Permazyme

Le traitement à la Permazyme est effectué au dosage de 0,002 % en suivant les protocoles expérimentaux décrits dans le chapitre précédent. Les résultats obtenus sur le limon et l'argile sont présentés puis complétés par des essais de compactage sur deux matériaux sableux. La synthèse des résultats obtenus permet d'apporter des éléments de réflexion relatifs au mode d'action du produit puis de définir les applications potentielles du traitement en fonction de la nature des sols et des conditions de mise en œuvre.

III.2.1 Traitement du limon de Moussy

Différentes propriétés géotechniques ont été étudiées (compactage, résistance à la compression simple, gonflement et coefficient de perméabilité). En fonction des résultats obtenus des études spécifiques complètent les connaissances sur les conditions de mise en œuvre (effet d'un temps de cure avant compactage par exemple). L'effet du traitement sur la microstructure permet également d'apporter des informations complémentaires sur l'action du traitement. Enfin, une recherche d'applications spécifiques combinant traitement au ciment et à la Permazyme est menée.

III.2.1.1 Propriétés de compactage

Les propriétés de compactage du sol traité ainsi que l'influence de paramètres tels l'énergie de compactage ou le temps de cure ont été étudiés.

a) Compactage Proctor normal

Les essais de compactage à l'énergie Proctor normale ont été effectués sur une large gamme de teneurs en eau. Les résultats montrent une augmentation de la masse volumique sèche pour des teneurs en eau comprises entre 8 et 16 % (Figure III.1). Pour des teneurs en eau inférieures à 8 %, aucune tendance particulière ne se dessine. Au-delà de 16 %, le traitement n'a plus d'effet. La masse volumique sèche maximale atteinte est augmentée par le traitement à 1,86 et la teneur en eau optimale réduite d'un point par rapport au sol non traité à 14,5 % (Tableau III.1).

En ce qui concerne la courbe d'indice portant immédiat, les principales modifications ont lieu pour des teneurs en eau voisines de l'optimum. Le traitement induit alors une réduction de la portance à teneur en eau donnée. Toutefois, les valeurs mesurées à l'optimum de compactage sont identiques (Tableau III.1).

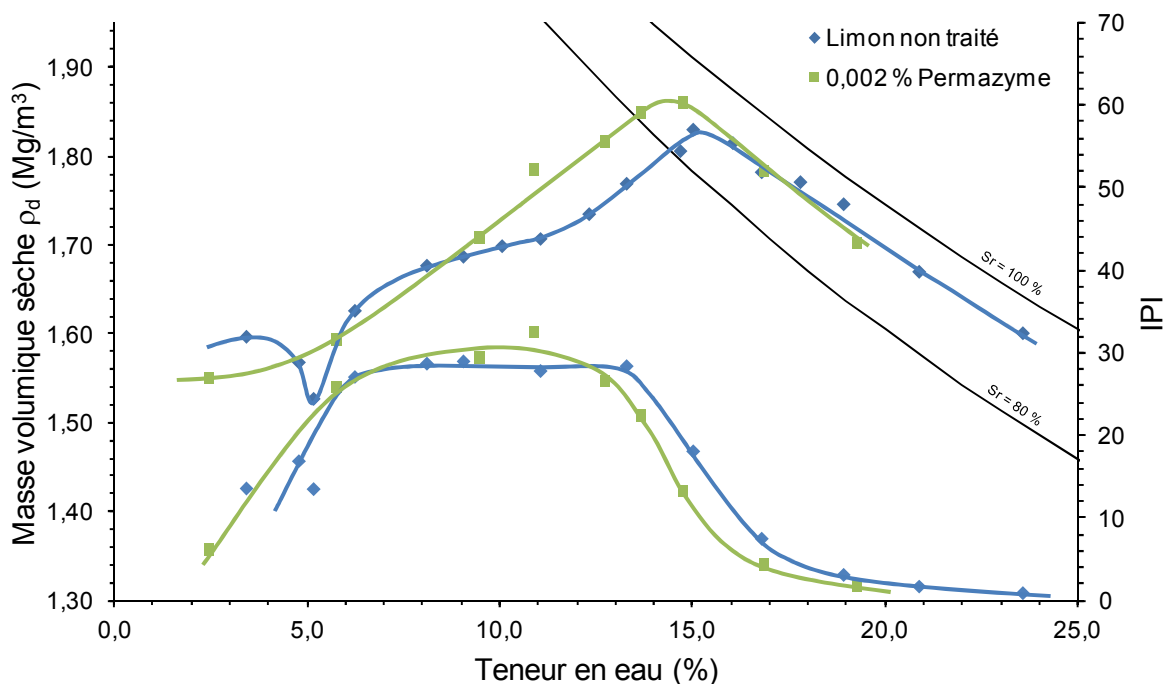


Figure III.1 : Courbes de compactage et de portance pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.

b) Influence du dosage

L'influence du dosage a été étudiée en augmentant le dosage de référence d'un facteur 10. Les courbes de compactage et de portance obtenues n'ont pas été affectées par cette modification (Tableau III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon en fonction du dosage en Permazyme.

Caractéristique	Non traité	Permazyme	
		0,002 %	0,02 %
W_{OPN} (%)	15,5	14,5	14,5
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,86	1,86
IPI_{OPN}	15	16	16
IPI_{max}	29	31	31

c) Influence de l'énergie de compactage

Lors des essais de compactage à l'énergie Proctor normale, le traitement à la Permazyme induit une augmentation de la masse volumique sèche atteinte. Ce phénomène est similaire à celui observé lors d'une augmentation de l'énergie de compactage. Ainsi, l'influence de ce paramètre a été étudiée.

Lorsque l'énergie de compactage est augmentée, l'optimum Proctor du limon est déplacé vers le côté sec. La masse volumique sèche maximale augmente et la teneur en eau optimale est réduite (Figure III.2). Le traitement à la Permazyme contribue à accentuer ce phénomène y compris pour un compactage à l'énergie Proctor modifiée et permet au sol d'atteindre une masse volumique sèche maximale de 2,00 Mg/m³ contre 1,96 Mg/m³ en l'absence de traitement (Tableau III.2).

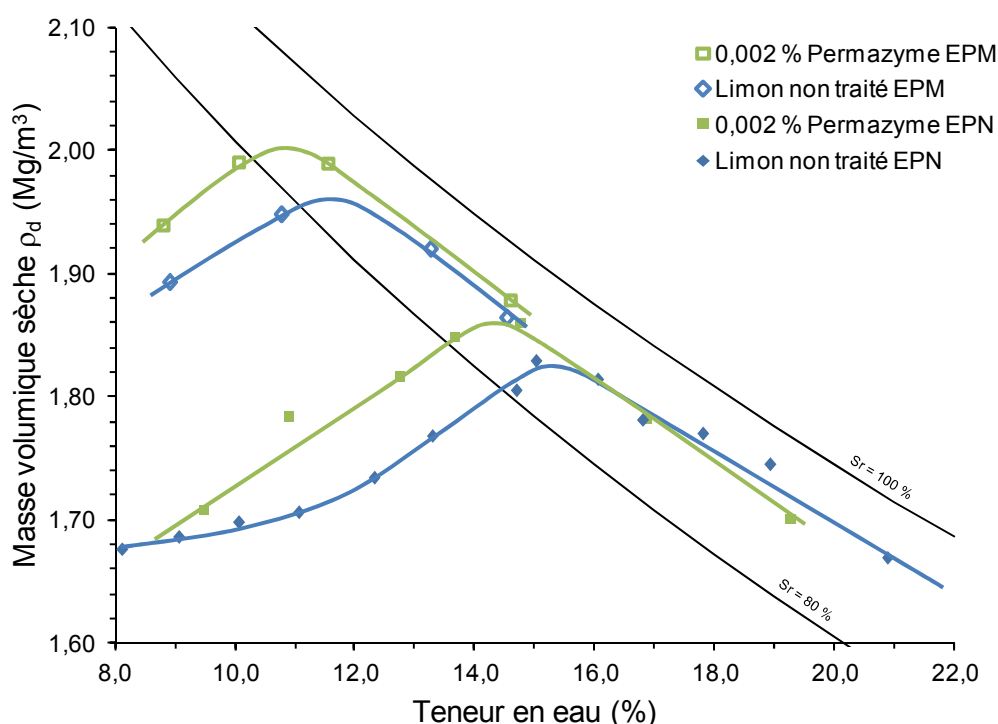


Figure III.2 : Courbes de compactage à l'énergie Proctor modifiée (EPM) et à l'énergie Proctor normale (EPN) pour le limon traité à la Permazyme.

En échos au phénomène de densification observé après traitement, une réduction de l'énergie de compactage à 75 % de l'énergie Proctor normale conduit à atteindre les mêmes masses volumiques sèches que celles du sol non traité compacté à l'énergie Proctor normale (Figure III.3). Ce constat est vrai dès lors que la teneur en eau est inférieure à la teneur en eau optimale ($w < 15,0\%$). La réduction de l'énergie de compactage induit également une réduction de l'IPI du sol traité en particulier du côté sec de l'optimum. La portance maximale est alors réduite à 22 contre 31 pour le sol non traité compacté à l'énergie Proctor normale (Tableau III.2).

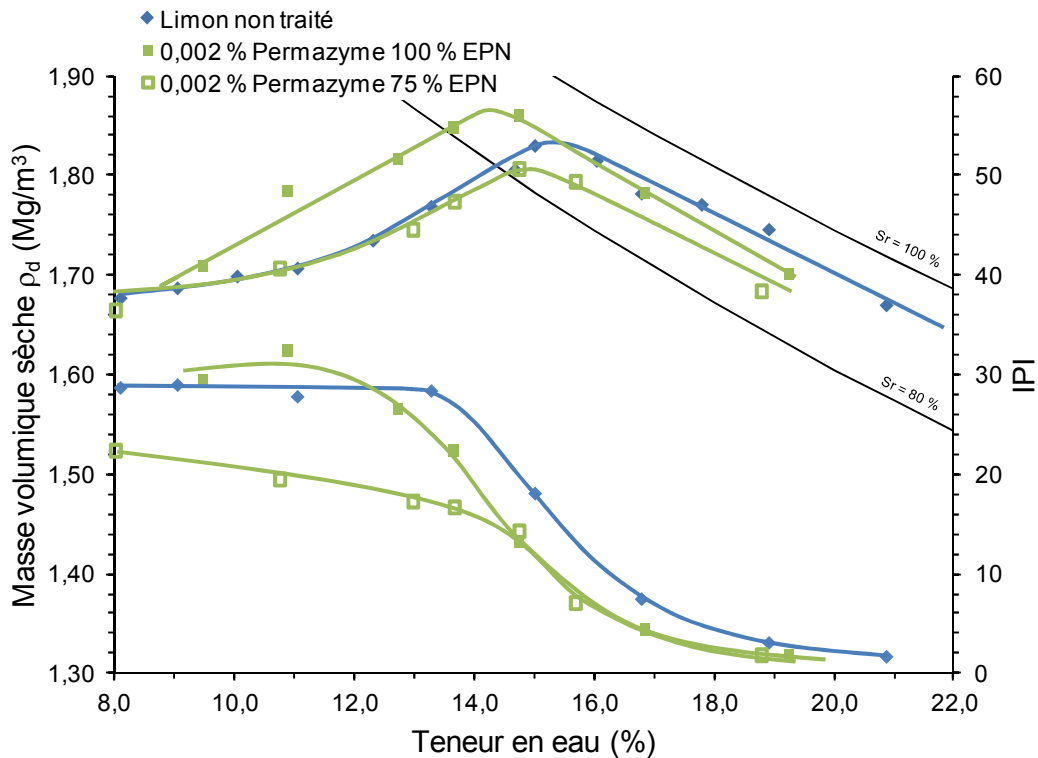


Figure III.3 : Courbes de compactage et de portance pour le limon traité à la Permazyme compacté à 75 % et 100 % de l'énergie Proctor normale (EPN).

Tableau III.2 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à la Permazyme pour différentes énergies de compactage.

Énergie de compactage	Traitement	w_{OPN} (%)	ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	IPI_{OPN}	IPI_{max}
EPM	Non traité	11,5	1,96	ND	ND
	0,002 % Permazyme	11,0	2,00	ND	ND
EPN	Non traité	15,5	1,82	15	29
	0,002 % Permazyme	14,5	1,86	16	31
75 % EPN	0,002 % Permazyme	15,0	1,81	12	22

EPM : Énergie Proctor Modifiée ; EPN : Énergie Proctor Normale

ND : Non Déterminé

d) Influence du temps de cure avant et après compactage

Le produit de traitement étant qualifié de biodégradable, la question de sa persistance au contact du sol peut être soulevée. L'influence d'une cure d'une semaine préalable au compactage a été étudiée en laissant évoluer le matériau traité en sacs plastiques fermés stockés à température ambiante. Passé ce délai, le sol est compacté. Les résultats obtenus montrent que la courbe Proctor et la courbe de portance sont alors confondues avec celles du sol non traité. Le traitement a donc perdu son efficacité du fait de la cure.

L'effet d'un temps de cure sur la portance mesurée après compactage a également été étudié. Les éprouvettes de sol traité sont compactées à 75 % de l'énergie Proctor normale pour atteindre des états de compaction identiques à ceux du sol non traité (cf. Figure III.3) et s'affranchir ainsi des effets de densité. Après compactage, l'excès de matériau est arasé puis le moule retourné et replacé sur son support. Un film plastique est déposé au fond du moule et à la surface du sol puis le moule est scellé dans un sac plastique afin d'éviter sa déshydratation. Le dispositif est alors laissé une semaine au repos à 20°C. Une fois la cure achevée, la hauteur de l'éprouvette est vérifiée. Les déformations relevées se sont révélées très faibles, avec des variations absolues de moins de 0,1 %. De même, la perte de teneur en eau était inférieure à 0,3 %.

Les résultats obtenus pour deux échantillons compactés du côté sec de l'optimum témoignent d'une augmentation de la portance au bout de 7 jours de cure (Figure III.4). Toutefois, les valeurs mesurées demeurent inférieures à la portance du sol non traité compacté à des masses volumiques sèches et teneurs en eau identiques. Par exemple, pour une teneur en eau de compactage de 11 %, l'IPI de mise en œuvre du sol traité est de 19. Au bout de 7 jours, l'indice portant (IP 7j) augmente à 24. Malgré cette augmentation, l'IPI demeure inférieur à celui du sol non traité (28). Cette observation traduit le fait qu'après mise en œuvre du sol traité, les caractéristiques de portance sont susceptibles d'augmenter durant quelques jours.

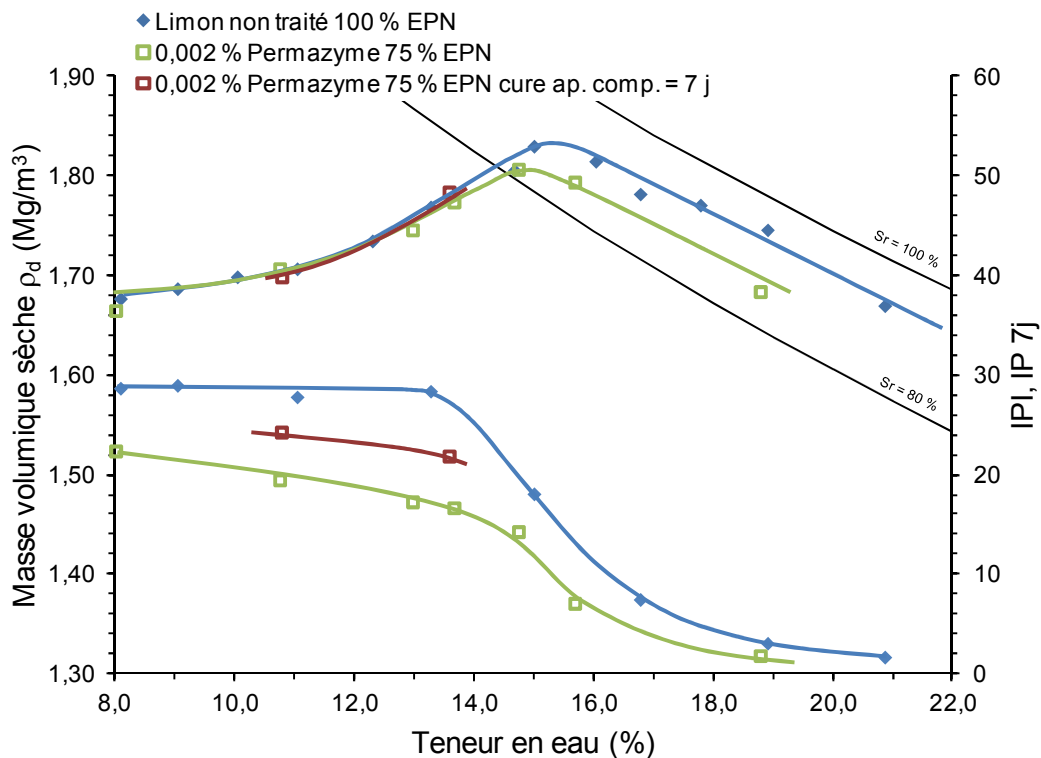


Figure III.4 : Courbes de compactage à 75 % de l'EPN du limon traité à la Permazyme et portances mesurées immédiatement après compactage (IPI) et après 7 jours de cure (IP 7j).

e) Essai CBR en immersion

Les essais CBR en immersion ont été réalisés sur une gamme de teneurs en eau allant de 8 à 18 %. Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'indice CBR après immersion pour le sol traité à la Permazyme (Figure III.5). Par exemple, à l'optimum Proctor, l'indice CBRi atteint, est supérieur à celui du sol non traité (Tableau III.3).

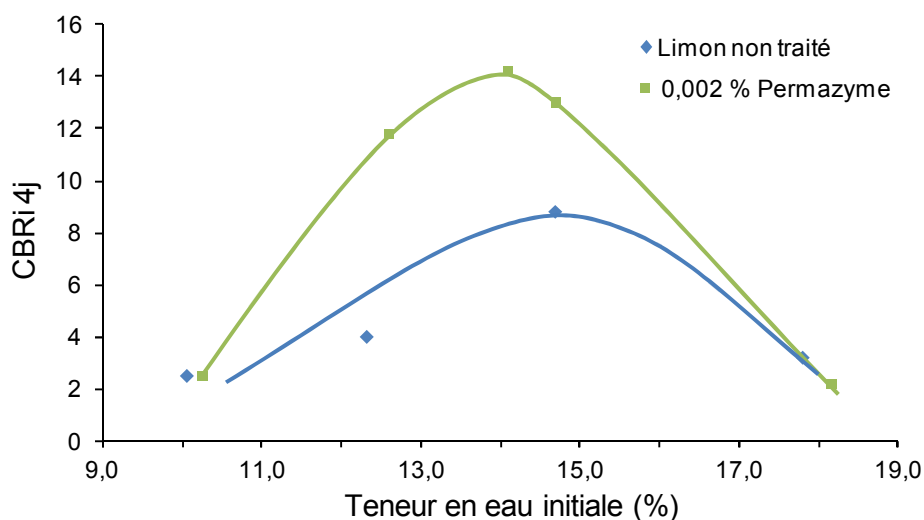


Figure III.5 : Indice CBR après 4 jours d'immersion (CBRi 4j) pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.

Tableau III.3 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du limon traité à 0,002 % de Permazyme.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	8,8	0,42	1,0
0,002 % Permazyme	14,2	0,84	0,7

Durant la phase d'immersion, le suivi du gonflement a permis de constater qu'en 24 heures, au moins 90 % du potentiel de gonflement à 4 jours était atteint et que les valeurs mesurées à 4 jours pouvaient être considérées comme stabilisées. Les mesures montrent que le potentiel de gonflement du sol tend à être réduit après traitement (Figure III.6). Toutefois, les écarts demeurent faibles, inférieurs à un pourcent et peuvent être expliqués par le degré de saturation inférieur de 2 à 6 points des éprouvettes traitées par rapport aux éprouvettes non traitées. Les éprouvettes en reprenant moins d'eau limiteraient ainsi leur gonflement. Par ailleurs, l'obtention de masses volumiques sèches plus élevées lors du compactage du sol traité est vraisemblablement à l'origine de l'amélioration des indices CBR après immersion observée après traitement.

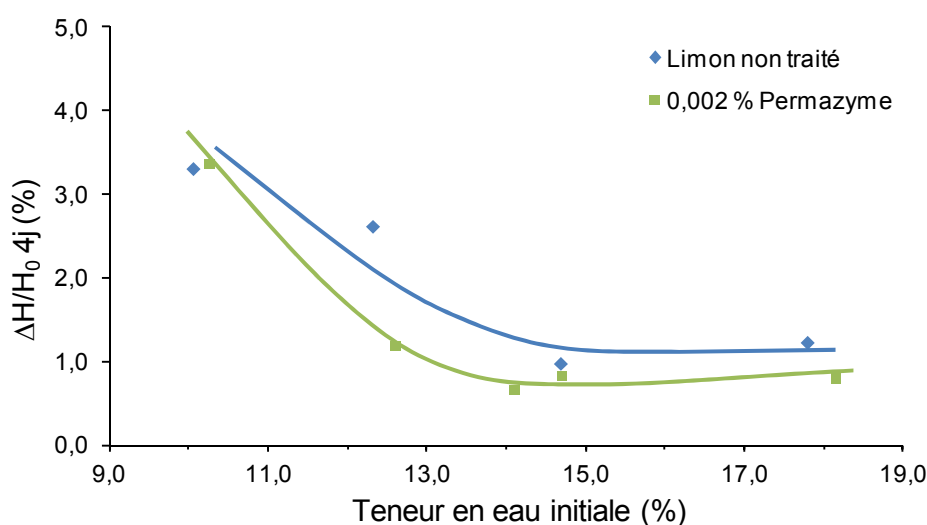


Figure III.6 : Potentiel de gonflement du limon traité à 0,002 % de Permazyme après 4 jours d'immersion.

f) Bilan des propriétés de compactage

Les essais de compactage montrent que le traitement du limon à la Permazyme :

- entraîne une réduction de la teneur en eau optimale, ainsi qu'une augmentation de la masse volumique sèche maximale lors d'un compactage à l'énergie Proctor normale ou à l'énergie Proctor modifiée,
- a un effet sur la courbe de compactage équivalent à un compactage plus intense ce qui entraîne un meilleur comportement mécanique lors de l'immersion,

- est insensible à une augmentation de dosage au-delà des préconisations du fournisseur,
- permet d'atteindre des densités identiques à celles du sol non traité en réduisant l'énergie de compactage à 75 % de l'EPN,
- réduit l'IPI par rapport au sol non traité compacté à une teneur en eau et densité identique,
- entraîne une augmentation de la portance au cours du temps. La dégradation du produit est l'une des hypothèses pouvant expliquer le phénomène observé.
- perd son efficacité si le compactage n'est pas effectué rapidement après traitement.

III.2.1.2 Résistance à la compression simple

Deux paramètres ont été testés pour caractériser la résistance à la compression simple des éprouvettes de limon traité à la Permazyme : l'influence du temps de cure et celle des références de compactage.

a) Influence du temps de cure

Les résultats des essais de résistance à la compression simple (Figure III.7) montrent que le traitement entraîne une augmentation de 20 % de la résistance du sol. Toutefois, aucune évolution n'est observée entre 7 et 28 jours de cure.

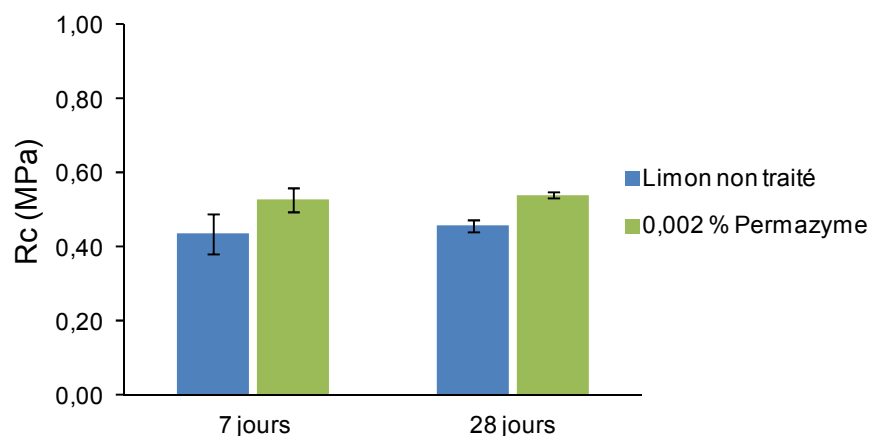


Figure III.7 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,002 % de Permazyme après 7 et 28 jours de cure.

Lors de ces essais, les éprouvettes ont été compactées aux optimum Proctor respectivement atteints pour le sol non traité et traité à 0,002 % de Permazyme. De ce fait, les éprouvettes de sol traité sont plus sèches et plus denses que celles du sol non traité. Afin de caractériser l'effet du traitement sur la résistance à la compression simple du sol, l'influence des références de compactage a été testée.

b) Influence des références de compactage

Les valeurs de résistance à la compression simple à 7 et 28 jours ont été mesurées pour différentes références de compactage faisant varier la teneur en eau de mise en œuvre et la masse volumique sèche du sol. Il a ainsi été possible d'observer que lorsque les références de compactage sont identiques, les résistances à la compression simple sont les mêmes, que le sol soit traité ou non.

III.2.1.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique

La comparaison entre les résultats des essais de gonflement unidimensionnel et de perméabilité sont effectués entre des éprouvettes compactées à l'optimum Proctor et du côté sec de l'optimum (Figure III.8). Les valeurs mesurées sont représentées en paramètre dans le plan (ρ_d ; w). Les potentiels de gonflement sur l'ensemble des points sont inférieurs à 5 %. Aucune différence significative ne peut être observée par rapport au sol non traité.

Les coefficients de perméabilité sont également peu affectés pour les éprouvettes compactées à l'optimum (points A et B) : $1,9 \cdot 10^{-8}$ m/s pour le sol traité contre $4,0 \cdot 10^{-8}$ m/s sans traitement (Figure III.8). De même, du côté sec, les valeurs obtenues à teneurs en eau et masses volumiques sèches identiques sont similaires (D). Le sol non traité compacté du côté sec sur la courbe de compactage présente la perméabilité la plus forte ($7,7 \cdot 10^{-7}$ m/s) du fait de sa densité moindre (C). Les degrés de saturation mesurés étaient tous compris entre 94 et 100 % à la fin des essais de perméabilité. En conclusion, les résultats obtenus indiquent que la Permazyme n'a pas d'effet direct sur le coefficient de conductivité hydraulique du limon mais que le traitement en augmentant la compacité du sol réduit sa perméabilité.

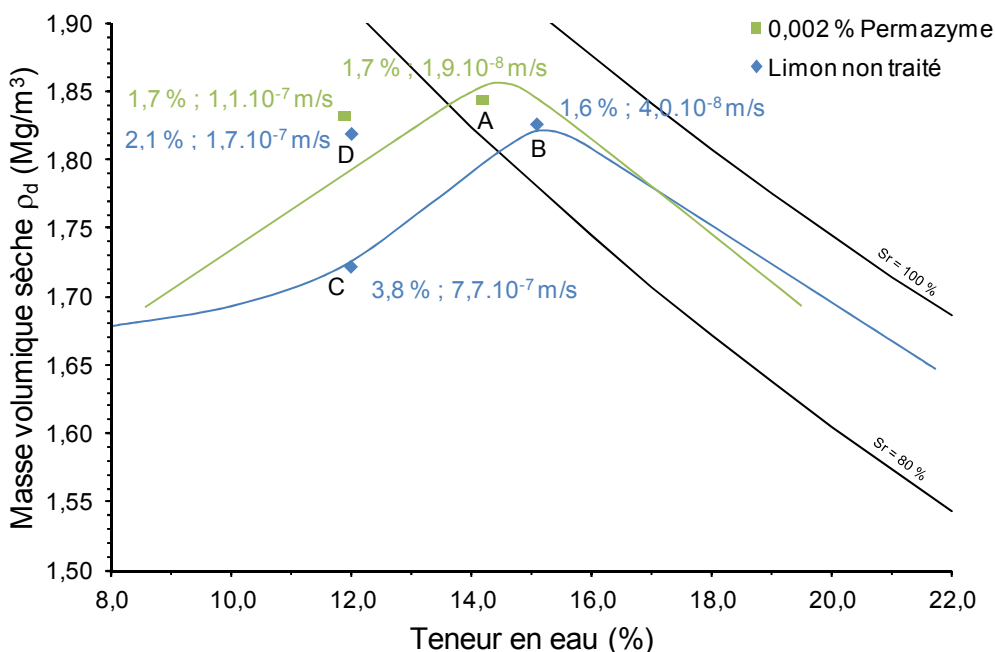


Figure III.8 : Potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité du limon traité à 0,002 % de Permazyme en fonction des caractéristiques de compactage.

III.2.1.4 Caractéristiques d'identification

La mesure de la valeur d'adsorption au bleu de méthylène après 7 et 28 jours de cure pour le limon traité donnent respectivement des valeurs de 3,2 et 2,8 g/100g de sol sec. Ces valeurs encadrent la moyenne observée pour le sol non traité (3,1 g/100g) signifiant l'absence d'effet significatif du traitement et du temps de cure. Par ailleurs, les limites d'Atterberg du limon n'ont pas été modifiées par le traitement (Figure III.9). De même, le pH du sol n'est pas modifié.

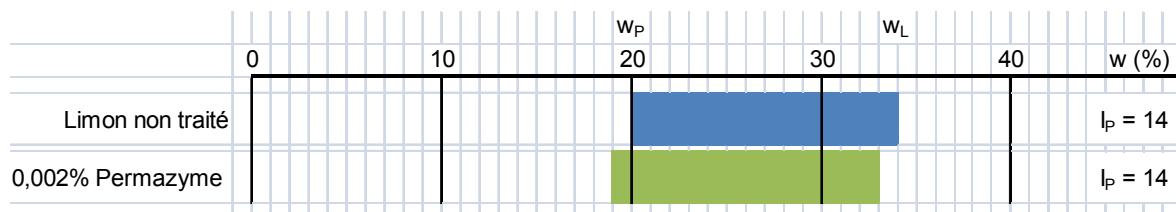


Figure III.9 : Indices de plasticité du limon traité à 0,002 % de Permazyme.

III.2.1.5 Microstructure du limon traité

Les images MEB de l'échantillon traité à la Permazyme montrent une structure identique à toutes les échelles d'observation. La comparaison des images prises pour le limon non traité et traité à 0,002 % de Permazyme illustre ce constat (Figure III.10).

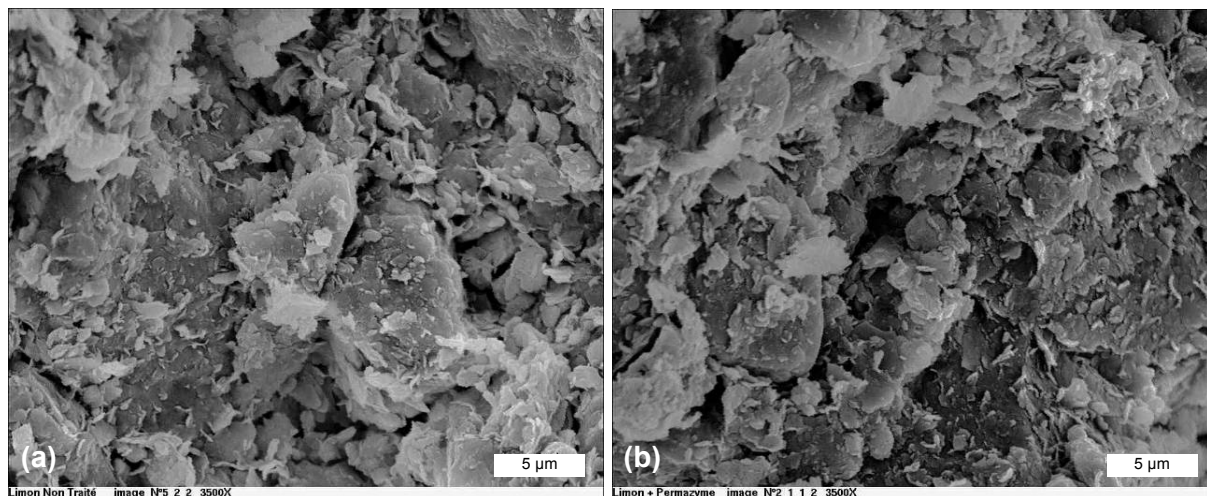


Figure III.10 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,002 % de Permazyme (b).

Les résultats de l'étude par porosimétrie au mercure indiquent que le volume injecté dans le sol traité est légèrement plus faible que celui injecté dans l'échantillon non traité (Figure III.49). En effet, l'échantillon traité atteint une densité sèche supérieure lors du compactage et possède donc un indice des vides plus faible (0,43 au lieu de 0,47). Ainsi, un volume moindre de mercure peut être injecté dans l'échantillon. L'augmentation de densité du sol traité se traduit sur la courbe de répartition des pores par une diminution de la fréquence des pores de rayons compris entre 3 et 10 µm.

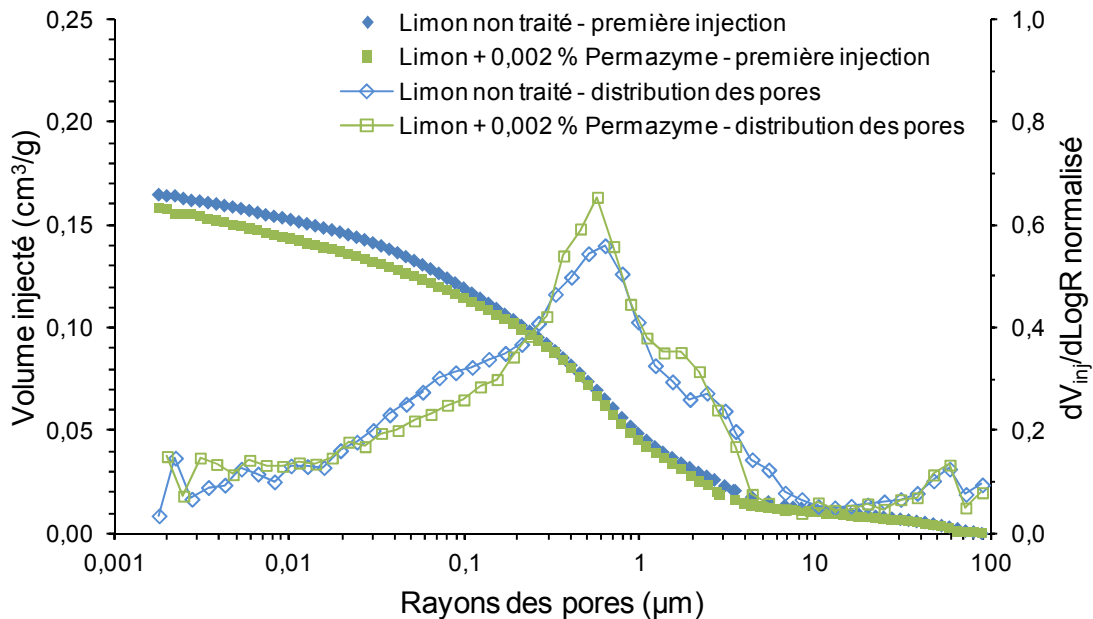


Figure III.11 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 0,002 % de Permazyme.

III.2.1.6 Effet d'une association avec du ciment

Le traitement du limon à la Permazyme a montré la faculté du produit à augmenter la densité du sol. De ce fait, associer les traitements à la Permazyme et au ciment pourrait permettre de dépasser la densité atteinte lors du traitement au ciment seul et augmenter par ce biais les caractéristiques mécaniques du sol traité. L'effet de l'association ciment + Permazyme a été étudiée sur les propriétés de compactage et de portance, ainsi que sur la résistance à la compression simple.

La combinaison des deux produits a nécessité d'adapter le protocole de traitement. Au cours du traitement, la Permazyme est directement ajoutée après le ciment. Une fois le mélange effectué, le sol traité est laissé au repos durant 20 à 30 minutes. Les dosages appliqués sont de 6 % de ciment et 0,002 % de Permazyme.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de ciment seul a pour effet de réduire la masse volumique sèche atteinte à l'optimum. Lorsque le traitement au ciment est directement suivi par l'ajout de Permazyme, la réduction de la masse volumique sèche maximale s'accroît, la valeur atteinte est alors de $1,77 \text{ Mg/m}^3$ au lieu de $1,82 \text{ Mg/m}^3$ pour le sol non traité. Cependant, malgré la réduction de la masse volumique sèche du sol, le traitement à 6 % de ciment + 0,002 % de Permazyme améliore la portance du limon par rapport au traitement au ciment seul pour l'ensemble des teneurs en eau testées. À titre d'exemple, l'IPI mesuré à la teneur en eau optimale ($w_{OPN} = 15,5 \%$) passe de 24 à 29 (Tableau III.4).

Tableau III.4 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment et à 6 % de ciment + 0,002 % de Permazyme.

Caractéristique	Non traité	6 % ciment	6 % ciment + 0,002 % Permazyme
W_{OPN} (%)	15,5	15,5	15,5
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,79	1,77
IPI_{OPN}	15	24	29
IPI_{max}	29	32	35

En complément aux données de compactage, la résistance à la compression simple a été mesurée après 7, 28 et 90 jours de cure. Les résultats ont toutefois montré que l'évolution de la résistance à la compression simple est identique que le traitement au ciment soit associé ou non au traitement à la Permazyme. À 90 jours, la résistance moyenne atteinte est de 4,9 MPa pour le ciment contre 5,2 MPa pour le traitement au ciment + Permazyme.

En conclusion, l'association des traitements à la Permazyme et au ciment a pour principal effet d'accentuer la réduction de la masse volumique sèche maximale atteinte lors du compactage. Cependant, malgré des masses volumiques sèches réduites, les IPI mesurés sont plus élevés qu'en cas d'ajout de ciment seul. Ce phénomène pourrait traduire une accélération du phénomène de prise cimentaire suite à l'ajout de Permazyme. Toutefois, cette action ne se répercute pas sur les valeurs de la résistance à la compression simple.

III.2.1.7 Bilan : propriétés géotechniques du limon de Moussy traité

Lorsque le limon est traité à la Permazyme, ses caractéristiques d'identification et sa microstructure ne sont pas affectées. Cependant, le comportement au compactage du sol change, des masses volumiques sèches plus élevées sont alors atteintes du côté sec de l'optimum de compactage. Cette effet est observé aussi bien pour un compactage à l'énergie Proctor normale que modifiée. L'augmentation de masse volumique sèche après traitement induit une augmentation de la résistance à la compression simple, une amélioration de la portance du sol après immersion, et une réduction de la conductivité hydraulique. Par ailleurs, le produit étant biodégradable en quelques jours, le compactage du sol doit avoir lieu rapidement après application du traitement. De plus, une fois la structure compactée, une augmentation de la portance du sol est observée. La dégradation du produit est le phénomène le plus crédible pour expliquer cette observation.

III.2.2 Traitement de l'argile de Couthenans

Les résultats du traitement de l'argile de Couthenans à 0,002 % de Permazyme sont présentés dans les paragraphes suivants.

III.2.2.1 Propriétés de compactage

Le traitement à la Permazyme ne modifie pas la courbe Proctor du sol de façon significative (Figure III.12). De même, la courbe d'indice portant immédiat est identique à celle du sol non traité.

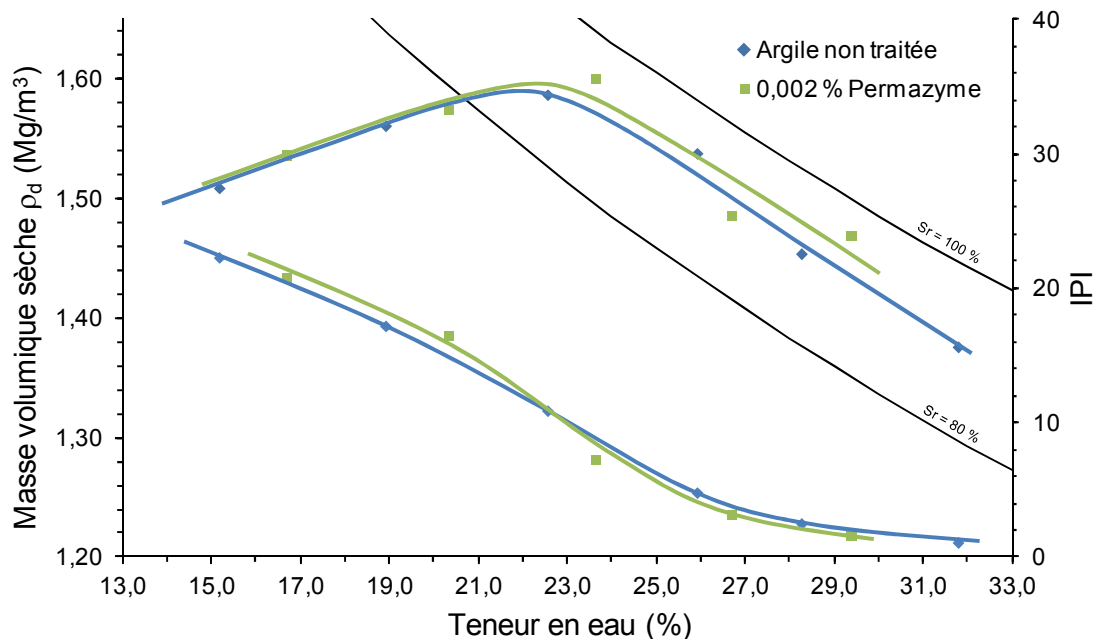


Figure III.12 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.

L'indice CBR mesuré après 4 jours d'immersion est très faible. Voisin de 1, il est comparable à celui du sol non traité (Tableau III.5). Le gonflement observé à la fin de l'essai est alors d'un pourcent inférieur au gonflement relevé pour l'argile non traitée, toutefois la durée de l'essai n'est pas suffisante pour atteindre la stabilisation du gonflement.

Tableau III.5 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	0,9	0,08	3,7
0,002 % Permazyme	1,2	0,11	2,7

III.2.2.2 Résistance à la compression simple

Les résistances à la compression simple des éprouvettes confectionnées à l'optimum de compactage du sol traité ne sont pas modifiées par le traitement et n'évoluent pas au cours du temps. Les valeurs moyennes calculées restent comprises entre 320 et 390 kPa toutes modalités confondues.

III.2.2.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique

Les éprouvettes d'argile compactées à l'OPN ($w = 22,0 \%$; $\rho_d = 1,59 \text{ Mg/m}^3$) n'ont pas montré de différences significatives du potentiel de gonflement et du coefficient de perméabilité suite au traitement (Tableau III.6).

Tableau III.6 : Caractéristiques de compactage, potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.

Traitement	w (%)	ρ_d (Mg/m ³)	$\Delta H/H_0$ (%)	k (m/s)	Sr _f (%)
Non traité	23,0	1,60	9,4	$7,5 \cdot 10^{-9}$	99,5
0,002 % Permazyme	22,7	1,60	9,5	$5,3 \cdot 10^{-9}$	97,5

III.2.2.4 Caractéristiques d'identification

Les valeurs au bleu de méthylène mesurées après 7 et 28 jours de cure sont respectivement de 6,7 et 6,6 g/100g contre 6,4 g/100g en moyenne pour l'argile non traitée. Il n'y a donc pas eu de modification de la surface spécifique du sol suite au traitement ni d'évolution au cours du temps. De même, les limites d'Atterberg du sol (Figure III.13) et le pH n'ont pas été modifiés par le traitement

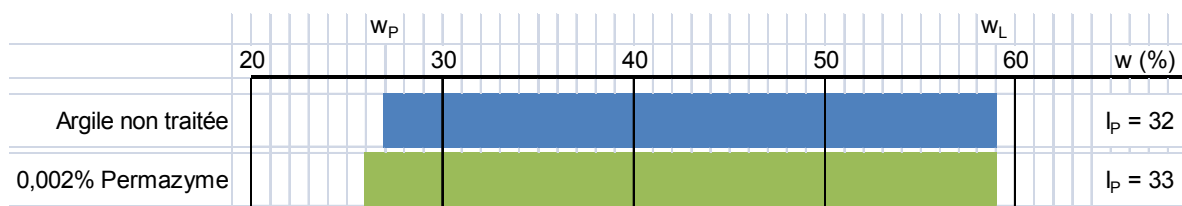


Figure III.13 : Indices de plasticité de l'argile traitée à 0,002 % de Permazyme.

III.2.3 Traitement de sables

Afin d'étendre la gamme de sols étudiés, deux matériaux sableux ont été traités à la Permazyme. Le choix s'est en particulier porté sur un sable homométrique dont le compactage et l'emploi sont généralement problématiques.

Pour le sable B5, les résultats montrent une assez forte variabilité. Toutefois, le traitement ne semble pas avoir d'effet significatif sur le comportement du matériau.

Le compactage du sable homométrique D1 montre que les masses volumiques sèches atteintes, comprises entre $1,56$ et $1,62 \text{ Mg/m}^3$ après traitement, sont identiques à celles du sol non traité. Les valeurs d'IPI mesurées sont comprises entre 4 et 10. Toutefois, après traitement, la portance du sol est réduite, l'IPI maximal mesuré est alors de 4. Cet effet ne peut être imputé à des différences de densité lors du compactage mais traduit l'aptitude du produit à faciliter la déformation du sol sous chargement. Le mécanisme potentiellement à l'œuvre est détaillé par la suite.

III.2.4 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie

Les données obtenues dans cette étude montrent que l'impact du traitement à la Permazyme sur les propriétés de compactage des sols est variable selon la nature du sol. Seule la courbe de compactage du limon a été modifiée de façon significative dans le sens d'une densification. Les résultats issus de la littérature mentionnent également des effets sur le compactage (Rajendran & Lytton, 1997 ; Rauch *et al.* 2003), toutefois aucune tendance n'en a été déduite.

La résistance à la compression simple des sols traités compactés à des références de compactage identiques n'est pas améliorée et n'évolue pas au cours du temps. Cependant, lorsque les références de compactage du sol sont modifiées par le traitement, la résistance à la compression simple peut être améliorée comme dans le cas du traitement du limon. Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus dans la littérature (par ex. Tingle & Santoni, 2003) à l'exception de certains auteurs mentionnant des améliorations pouvant atteindre 70 % (par ex. Santoni *et al.* 2002). De telles améliorations n'ont toutefois pas été observées dans cette étude.

Le traitement n'a par ailleurs aucun effet sur les VBS et limites d'Atterberg du limon et de l'argile. De même, Rauch *et al.* (2002) et (2003) n'ont conclu qu'à des variations mineures des limites d'Atterberg des différents sols étudiés. Cet effet témoigne de l'absence de modification des caractéristiques intrinsèques des sols traités et de tout phénomène de prise. Ce constat est renforcé par l'absence de modification de la microstructure observée pour le limon.

L'une des particularités du produit de traitement est son aspect biodégradable. De ce fait, les actions observées à court terme (compactage, portance) disparaissent si le produit est laissé en contact avec le sol durant plusieurs jours avant compactage. Par ailleurs, lorsque le compactage suit directement l'application du traitement, les propriétés de portance sont susceptibles d'augmenter au fur et à mesure de la dégradation du produit. Puis, une fois le produit dégradé, le sol retrouverait un comportement identique à celui qui aurait été le sien s'il avait été compacté à une masse volumique sèche identique. L'intérêt technique principal du traitement réside donc dans sa capacité à faciliter le compactage.

III.2.5 Recherche des mécanismes d'action

Parmi les études recensées, aucun mécanisme d'action particulier ne semble se dessiner pour le traitement aux produits enzymatiques. Les modifications de la nature des sols sont limitées, seul leur état d'agrégation aurait dans certains cas été modifié. De plus, l'aspect biodégradable du produit limite les interactions potentielles entre le produit et le sol sur le long terme. Il semblerait que le mécanisme d'action ne soit pas à rechercher du côté de l'action biologique ou chimique, mais plutôt du côté des propriétés tensioactives de certains produits comme suggéré par Tingle *et al.*

(2004) ou Velasquez *et al.* (2006). L'effet de substances tensioactives sur les sols a été étudié par ailleurs. Quelques résultats sont présentés dans la suite de cette partie. Puis, afin de compléter les connaissances relatives au mode d'action de la Permazyme, des mesures complémentaires ont permis de caractériser ses propriétés tensioactives et de comparer les effets du produit à ceux d'un tensioactif couramment utilisé dans diverses applications industrielles : le Sodium Dodecyl Sulfate (SDS).

III.2.5.1 Effet des tensioactifs sur les caractéristiques mécaniques

Les tensioactifs sont des composés chimiques ayant la particularité d'abaisser la tension superficielle des fluides auxquels ils sont mélangés. Certaines études se sont intéressées aux effets de tels produits sur les propriétés hydromécaniques des sols.

a) Compactage

Plusieurs études se sont intéressées aux caractéristiques de compactage des sols traités avec des tensioactifs. Ainsi, Peck (1963), Berney *et al.* (2003) et Park *et al.* (2006) rapportent des effets similaires pour différentes natures de sols et de tensioactifs. L'ajout de produits tensioactifs à l'eau utilisée pour humidifier le sol amène à une augmentation de la masse volumique sèche maximale et à une réduction de la teneur en eau optimale. Un exemple extrait des travaux de Park *et al.* (2006) illustre ce phénomène pour trois tensioactifs (Figure III.14). Bien qu'un effet similaire soit observé, l'amplitude des modifications diffère en fonction de la nature du produit utilisé. Les dosages utilisés par Park *et al.* étaient de 1,1 g/L de Triton X-100, 23,7 g/L de SDS et 2,0 g/L de biosurfactant.

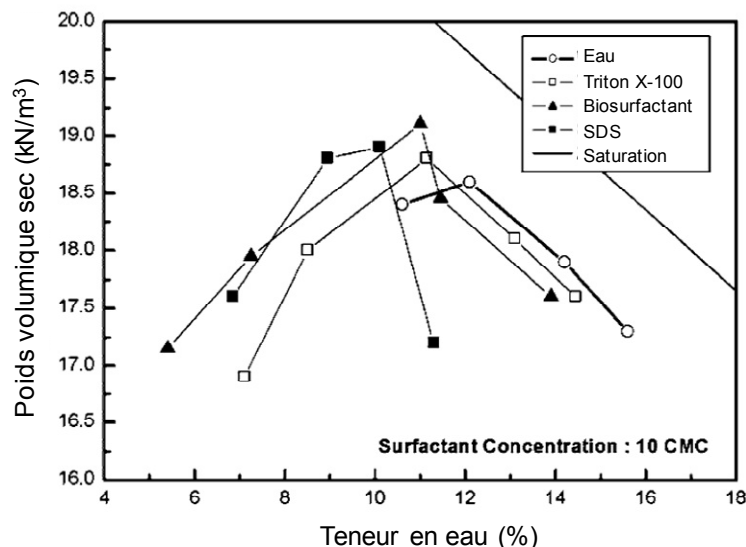


Figure III.14 : Courbes de compactage Proctor normal pour un mélange de 70 % de sable et 30 % de kaolinite traité avec différents tensioactifs (Park *et al.* 2006).

Parmi les études précédentes, seuls Berney *et al.* (2003) se sont intéressés aux effets de tensioactifs sur la portance. Les portances ont été mesurées selon la norme ASTM D1883 pour un compactage à l'énergie Proctor modifiée. Les résultats

obtenus montrent une tendance à la réduction de la portance après traitement pour les éprouvettes non immergées traitées avec une solution aqueuse de 4 % de bis (2-ethylhexyle) sulfosuccinate désigné par le signe AOT (Figure III.15). Au contraire, une amélioration de la portance est rapportée pour les éprouvettes ayant subi quatre jours d'immersion.

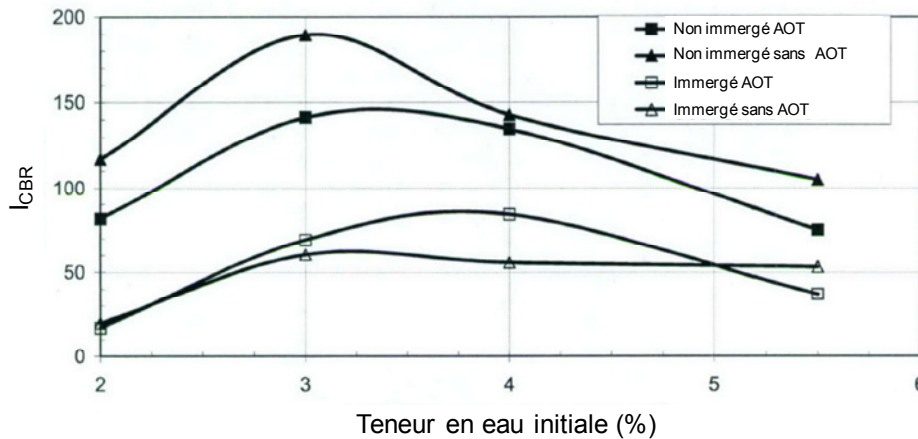


Figure III.15 : Effets du traitement avec une solution de 4% d'AOT sur l'indice CBR immédiat et immergé d'un sable limoneux (Berney et al. 2003).

b) Résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple d'un sol peut être affectée par l'apport de produits tensioactifs. Ainsi, Park *et al.* (2006) rapportent des améliorations maximales d'un facteur deux de la résistance à la compression simple après ajout de Triton X-100 et de biosurfactant. Le traitement avec une solution de SDS (23,7 g/L) induit au contraire une réduction d'un quart de la résistance du sol (75 kPa au lieu de 100). Malgré les faibles résistances mesurées, les auteurs attribuent les améliorations à l'augmentation de la compacité du sol traité. Au cours des essais, la formation d'une mousse de SDS est observée. Selon les auteurs, ce phénomène pourrait expliquer les réductions de résistance observées.

c) Conductivité hydraulique

Une tendance à la réduction d'un facteur 2 à 3 de la conductivité hydraulique est rapportée par Park *et al.* (2006) pour un mélange sable – kaolinite traité avec trois solutions aqueuses contenant des tensioactifs. Les auteurs proposent un ensemble de phénomènes pouvant expliquer cette réduction (modification du pH, de la densité, de la viscosité, colmatage des pores, etc.) sans toutefois trancher pour un phénomène particulier.

III.2.5.2 Mode d'action des tensioactifs

Le principal mode d'action évoqué pour expliquer les effets des tensioactifs sur les propriétés mécaniques des sols est la réduction de la tension superficielle de l'eau interstitielle (Tingle *et al.* 2004).

Dans les sols non saturés, la réduction des forces de cohésion apparente existant entre les grains faciliterait le compactage du sol. L'un des paramètres régissant les forces se développant entre les éléments d'un sol non saturé est la succion capillaire, reliée à la tension superficielle du fluide selon la relation :

$$s = \frac{2T_s \cos(\theta)}{r}$$

avec s la succion capillaire, T_s la tension superficielle du fluide à l'interface solution - air, θ l'angle de contact entre le solide et le liquide et r le rayon des pores. Selon cette relation, une réduction de la tension superficielle conduit à une réduction de la succion capillaire tout paramètre étant inchangé par ailleurs.

III.2.5.3 Propriétés tensioactives de la Permazyme

Les caractéristiques tensioactives de la Permazyme ont été caractérisées par la méthode de l'anneau de Du Noüy (1919). Les résultats indiquent que la Permazyme possède des propriétés tensioactives similaires à celles du SDS (Figure III.16). Pour un dosage de 1,0 g/L, la tension superficielle de l'eau est réduite à 29 mN/m au lieu de 73 mN/m pour l'eau distillée seule. Au-delà d'un gramme par litre, les valeurs de tension superficielles atteintes ne sont plus affectées par l'augmentation du dosage.

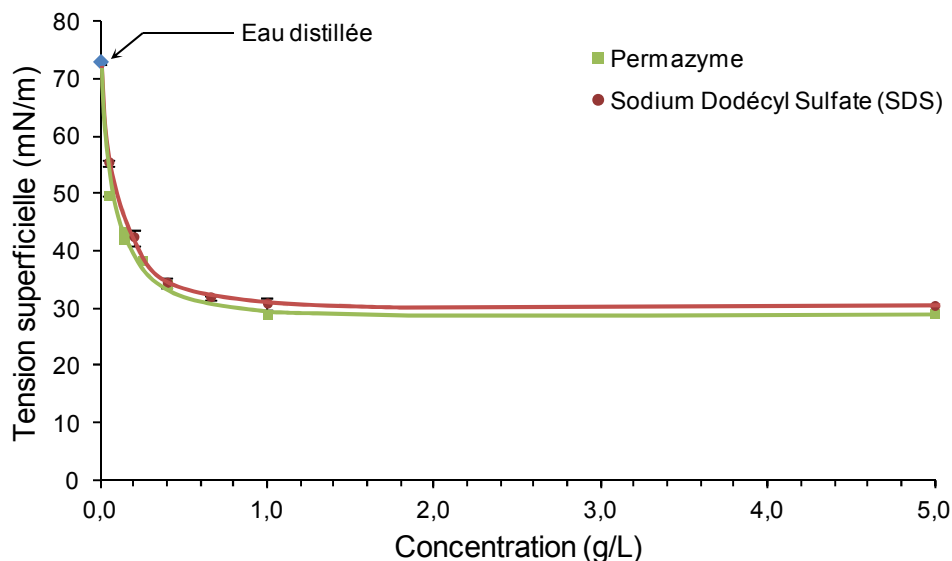


Figure III.16 : Tension superficielle d'une solution aqueuse de Permazyme et de SDS à différentes concentrations massiques.

III.2.5.4 Traitement du limon au SDS

Afin de comparer l'effet du traitement du limon avec un tensioactif avec les résultats obtenus pour le traitement à la Permazyme, un traitement à 0,01 % de SDS a été entrepris. Ce dosage est retenu car il permet de minimiser la tension superficielle tout en limitant la quantité de produit à apporter. La première étape du traitement consiste à dissoudre une poudre de SDS dans de l'eau distillée. Une fois la solution

aqueuse de SDS homogénéisée, la procédure suivie est identique à celle utilisée pour le traitement à la Permazyme.

Les résultats obtenus pour les propriétés de compactage et de portance sont comparés avec ceux du traitement à la Permazyme (Figure III.17). De façon similaire au traitement à la Permazyme, l'ajout de SDS a pour effet d'augmenter la masse volumique sèche du sol dès lors que la teneur en eau de compactage est inférieure à w_{OPN} . La courbe de portance est également modifiée avec une réduction de l'IPI pour des teneurs en eau voisines de la teneur en eau optimale. Cependant, même si les effets du traitement à la Permazyme et au SDS sont similaires, les modifications observées sont plus faibles pour le traitement au SDS.

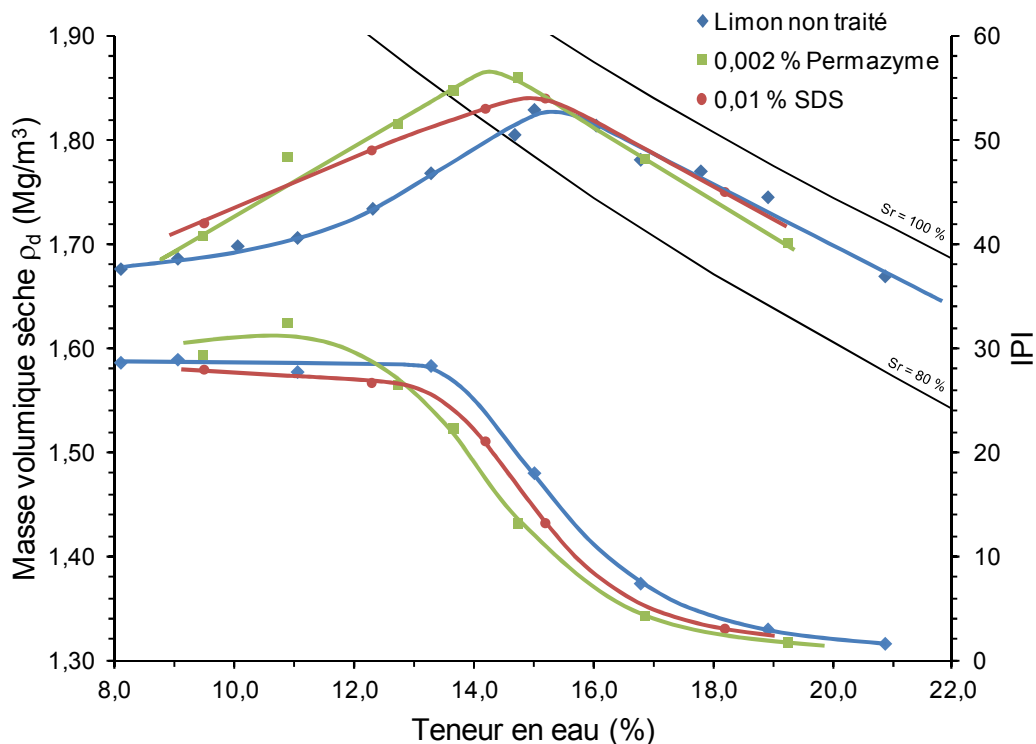


Figure III.17 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,01 % de SDS et à 0,002 % de Permazyme.

III.2.5.5 Mécanisme d'action de la Permazyme

Les résultats des essais mécaniques sur le limon traité à la Permazyme montrent un comportement similaire à celui rapporté dans la littérature et observé avec le SDS dans cette étude. Le produit ajouté au sol même en très faible quantité modifie les propriétés physiques de l'eau entraînant une meilleure lubrification des grains du sol facilitant ainsi le compactage et réduisant la résistance à la déformation. Ce phénomène est particulièrement bien illustré pour le limon et le sable D1. Toutefois, les propriétés du sable B5 et de l'argile A3 n'ont pas été affectées. Ce constat peut trouver une explication dans les interactions entre les molécules du tensioactif et les minéraux du sol. En effet, les tensioactifs peuvent également avoir des actions liantes ou dispersantes notamment pour des dosages élevés (par ex. Piccolo &

Mbagwu, 1989). La faculté de tensioactifs à se fixer sur une montmorillonite sodique a par exemple été mise en évidence par Hower (1970). L'adsorption la plus importante est rapportée pour les tensioactifs non ioniques et cationiques.

III.2.6 Apport technique et implications environnementales

Sont définis dans un premier temps les principales applications du traitement à la Permazyme et ses implications environnementales déduites des données factuelles acquises. Les recommandations devant être respectées pour bénéficier des avantages techniques du traitement sont également exposées puis une réflexion sur l'évolution des propriétés des sols traités au cours du temps est proposée.

III.2.6.1 Applications potentielles du traitement

Les principales applications du traitement à la Permazyme concernent le limon. Quant à l'argile, et aux deux sables, ces sols n'ont pas subi de modifications pouvant engendrer des applications intéressantes en terrassement. Les applications détaillées par la suite portent donc sur le limon de Moussy.

Le traitement apporte une meilleure efficacité du compactage pour la mise en œuvre du limon si les teneurs en eau de mise en œuvre sont comprises entre 11 et 15 %, c'est-à-dire sont situées du côté sec de l'optimum. Dans ce cas, plusieurs situations de mise en œuvre peuvent être envisagées pour satisfaire l'objectif de compactage. En prenant l'exemple d'une teneur en eau initiale de 9,0 % (état très sec au sens du GTR) et un objectif de compactage de $1,78 \text{ Mg/m}^3$, trois situations de mise en œuvre peuvent être considérées.

- La première situation considère un compactage à l'énergie Proctor normale, le sol non traité doit alors être humidifié jusqu'à une teneur en eau de 14 % (Figure III.18). Dans le cas du traitement à la Permazyme, le compactage peut avoir lieu à une teneur en eau de 11,5 % ce qui représente une économie d'eau de $44,5 \text{ m}^3$ pour 1000 m^3 de sol compacté.
- La seconde situation considère le cas où la teneur en eau finale de mise en œuvre est égale pour la variante traitée et non traitée ($w = 11,5 \%$). Dans ce cas, le sol non traité doit être compacté plus fortement (Figure III.19). Selon le GTR, une augmentation de 70 % ($0,4 \text{ MJ/m}^3$) de l'énergie de compactage est alors nécessaire pour atteindre la masse volumique sèche requise. L'utilisation du traitement constitue dans ce cas une économie d'énergie.
- La troisième situation de mise en œuvre (Figure III.20) consiste à compacter le sol sans modifier sa teneur en eau. Dans ce cas, une énergie importante doit être apportée en plus de l'énergie Proctor normale. La variante considérant le traitement requiert quant à elle une humidification puis un compactage à l'énergie Proctor normale.

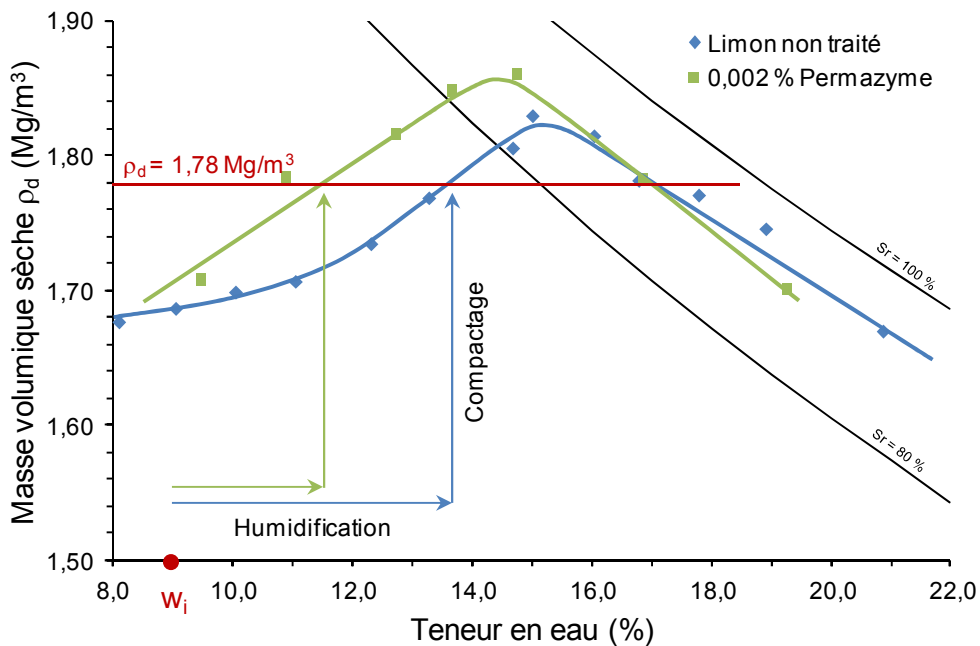


Figure III.18 : Situation de mise en œuvre n°1 ; le limon est humidifié puis compacté à l'énergie Proctor normale.

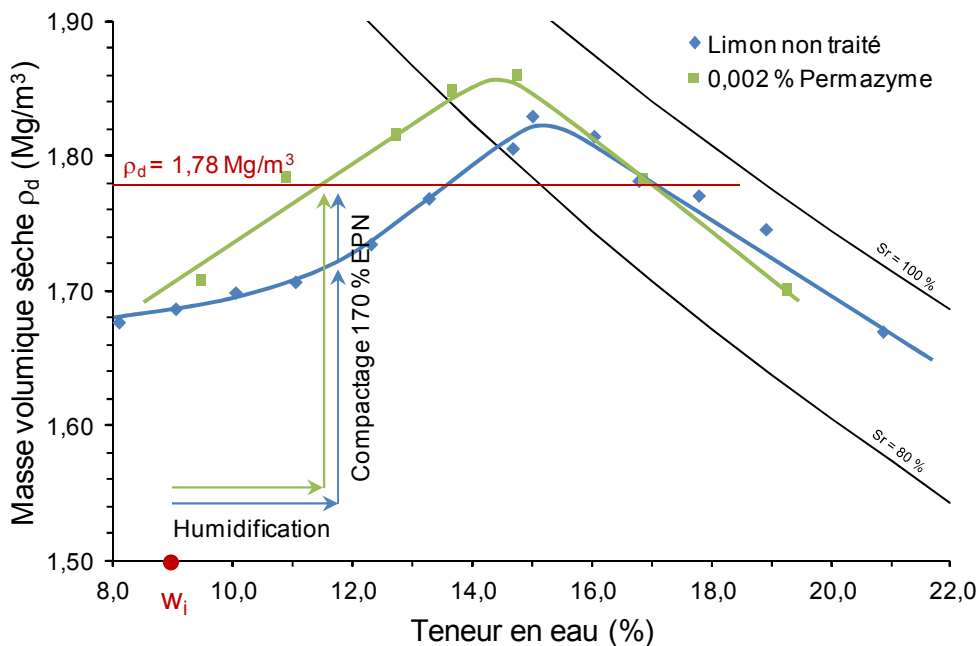


Figure III.19 : Situation de mise en œuvre n°2 ; le limon est humidifié à une teneur en eau finale identique puis compacté à l'énergie requise pour atteindre la masse volumique sèche visée.

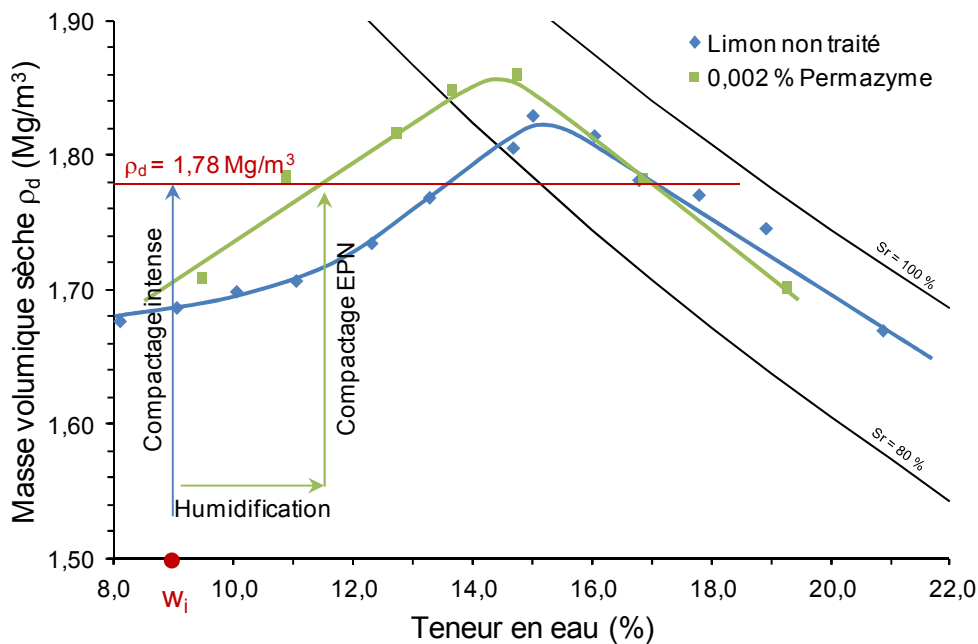


Figure III.20 : Situation de mise en œuvre n°3 ; le limon non traité est compacté intensément à sa teneur en eau in situ, ou traité et compacté à l'énergie Proctor normale.

III.2.6.2 Implications environnementales

Dans le cas de la variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme, des économies d'eau et/ou d'énergie peuvent être attendues comme montré précédemment. Toutefois, l'ajout du produit engendre également un impact sur l'environnement via sa dégradation ou son lessivage. Cependant, au cours du temps, la dégradation du produit de traitement n'engendrera vraisemblablement qu'un impact environnemental limité du fait du faible dosage utilisé (0,002 %). Les émissions de gaz à effet de serre induites (CO₂ ou CH₄) seront faibles. De même, en cas de lessivage du produit avant sa dégradation totale, les apports en éléments traces métalliques peuvent être négligés (cf. Chapitre II).

Le principal risque de pollution associé au traitement est lié à un éventuel déversement accidentel du produit concentré dans un cours d'eau où à proximité d'un aquifère. La teneur élevée en matière organique pourrait alors modifier l'oxygénation du milieu et conduire à une eutrophisation.

III.2.6.3 Recommandations d'utilisation du limon de Moussy

Étant donné les résultats obtenus sur le limon, certaines recommandations d'utilisation peuvent être définies pour bénéficier des intérêts techniques et environnementaux du traitement. Ainsi, pour bénéficier des augmentations de masses volumiques sèches les plus importantes, le compactage doit avoir lieu du côté sec de l'optimum pour des teneurs en eau finales comprises entre 11 et 15 %. Une attention particulière doit par ailleurs être portée à l'IPI en cas de compactage à une énergie réduite ou à une teneur en eau élevée, en effet, la réduction de la portance causée par le traitement peut alors affecter la traficabilité des engins. Par

ailleurs, afin d'éviter toute perte d'efficacité du traitement suite à la dégradation du produit, il est recommandé de compacter le sol dès l'application du traitement.

III.2.6.4 Évolution des caractéristiques mécaniques au cours du temps

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le traitement n'entraîne pas de modification de la nature du sol ni de sa microstructure. Il a également été mis en évidence que le produit se dégradait en quelques jours, le limon retrouvait alors son comportement non traité. Les portances atteintes resteront toutefois inférieures ou égales à celles qui auraient été mesurées pour une couche de sol non traité compactée à teneur en eau et masse volumique sèche égales. Les autres propriétés géotechniques (densité, résistance à la compression simple, coefficient de perméabilité, potentiel de gonflement) n'évolueront pas.

III.3 Traitement au lignosulfonate de calcium

Le traitement au lignosulfonate de calcium est effectué pour le limon et l'argile à différents dosages (0,5 ; 2,0 et 5,0 %) en suivant le protocole décrit dans le chapitre précédent. En fonction des résultats obtenus, des essais complémentaires peuvent être entrepris de façon spécifique. De plus, des essais de compactage sur des sables complètent les données.

III.3.1 Traitement du limon de Moussy

Les essais effectués sur le limon de Moussy ont été conduits dans le but de caractériser le comportement du sol traité (compactage, portance, résistance à la compression simple) et de mener une réflexion sur le mode d'action du produit en s'intéressant aux modifications de la microstructure et des caractéristiques d'identification du sol traité.

III.3.1.1 Propriétés de compactage

Les effets des trois dosages sur le compactage ont été évalués. Les essais sont complétés par une étude de l'influence de l'énergie et du temps de cure sur le comportement du matériau.

a) Compactage Proctor normal

Les caractéristiques de compactage et de portance du limon sont modifiées par l'ajout de lignosulfonate pour l'ensemble des dosages testés. Un dosage de 2,0 % conduit à une réduction de l'ordre de deux pourcents de la teneur en eau optimale (Figure III.21) et à une augmentation de la masse volumiques sèche maximale (1,85 contre 1,82 Mg/m³, cf. Tableau III.7). Un phénomène similaire mais d'ampleur moindre est observé pour le traitement à 0,5 % (Figure III.22). De même, au dosage de 5,0 %, les masses volumiques sèches atteintes sont plus élevées pour des

teneurs en eau comprises entre 9 et 15 %, mais au-delà, une réduction est constatée (Figure III.23).

Dans tous les cas, l'apport du lignosulfonate réduit l'IPI à teneur en eau donnée ainsi que l'IPI maximal. Toutefois, la portance mesurée à la teneur en eau de l'optimum Proctor pour les dosages de 0,5 et 2,0 % n'est pas modifiée (Tableau III.7). Le dosage à 5 % dégrade très fortement la portance du sol (Figure III.23). L'IPI à l'OPN du limon traité à 5 % de lignosulfonate est alors de 5 au lieu de 15. Un constat similaire est effectué pour la valeur de la portance maximale, réduite à 15 au lieu de 29 (Tableau III.7).

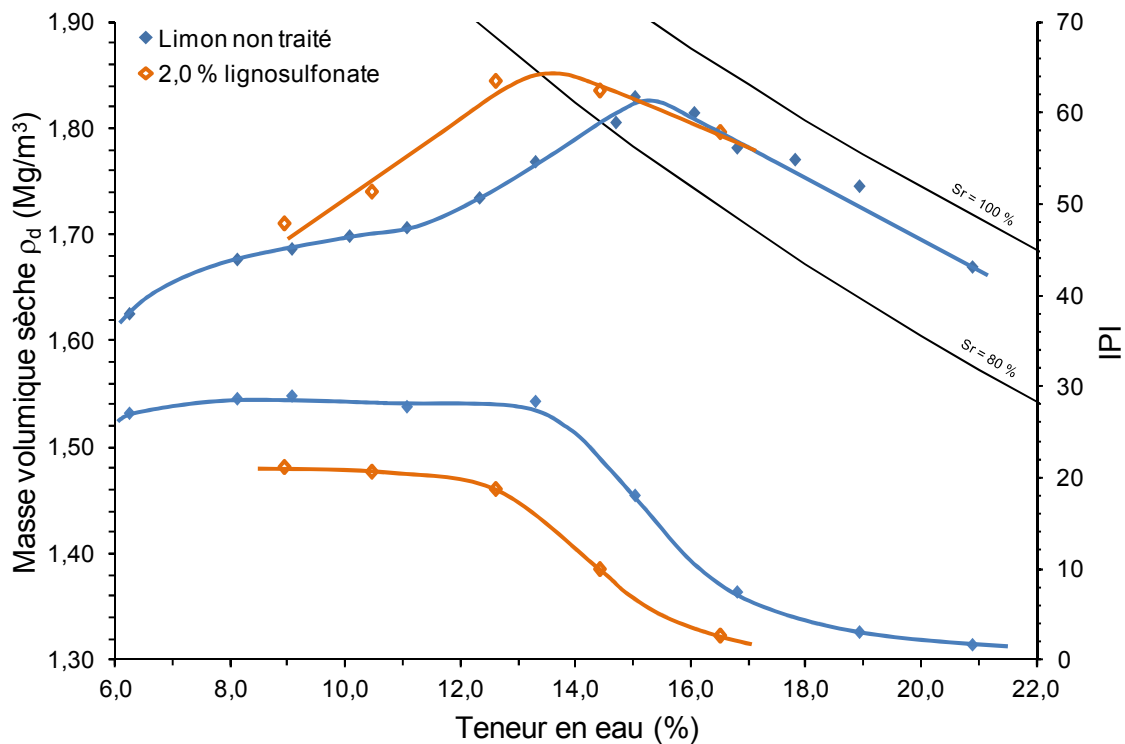


Figure III.21 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.

Tableau III.7 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à différents dosages en lignosulfonate.

Caractéristique	Non traité	Lignosulfonate		
		0,5 %	2,0 %	5,0 %
w_{OPN} (%)	15,5	14,5	13,5	14,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,84	1,85	1,83
IPI_{OPN}	15	15	14	5
IPI_{max}	29	27	21	15

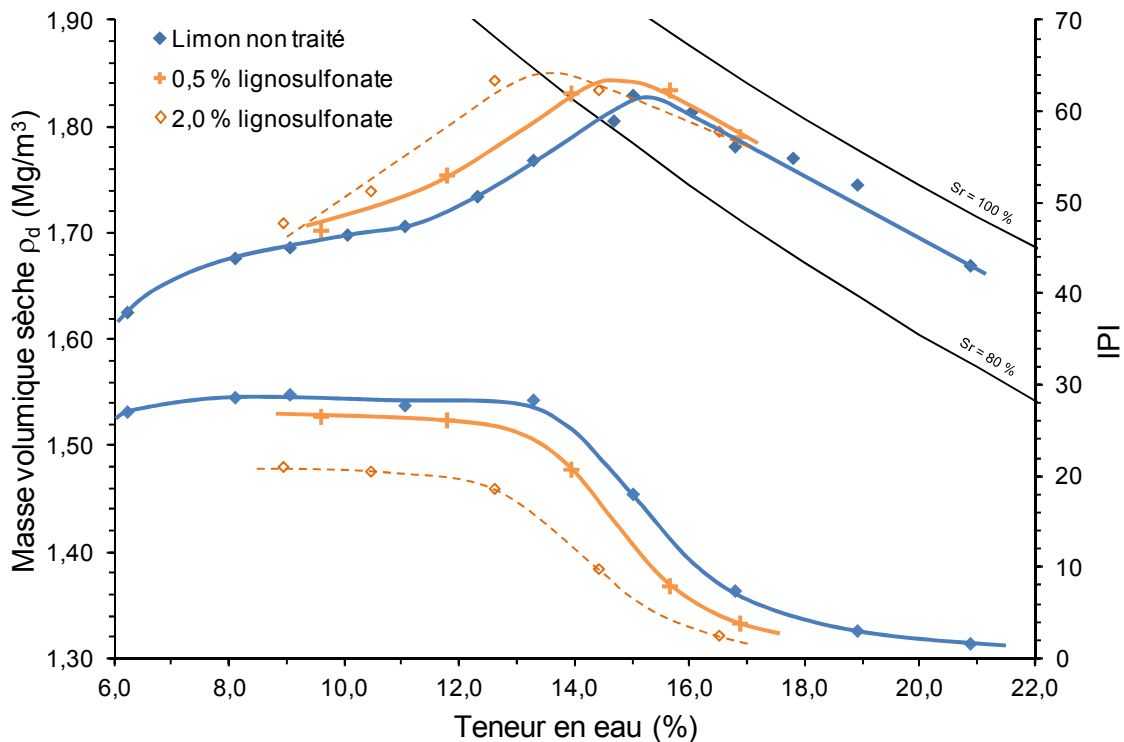


Figure III.22 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,5 % de lignosulfonate.

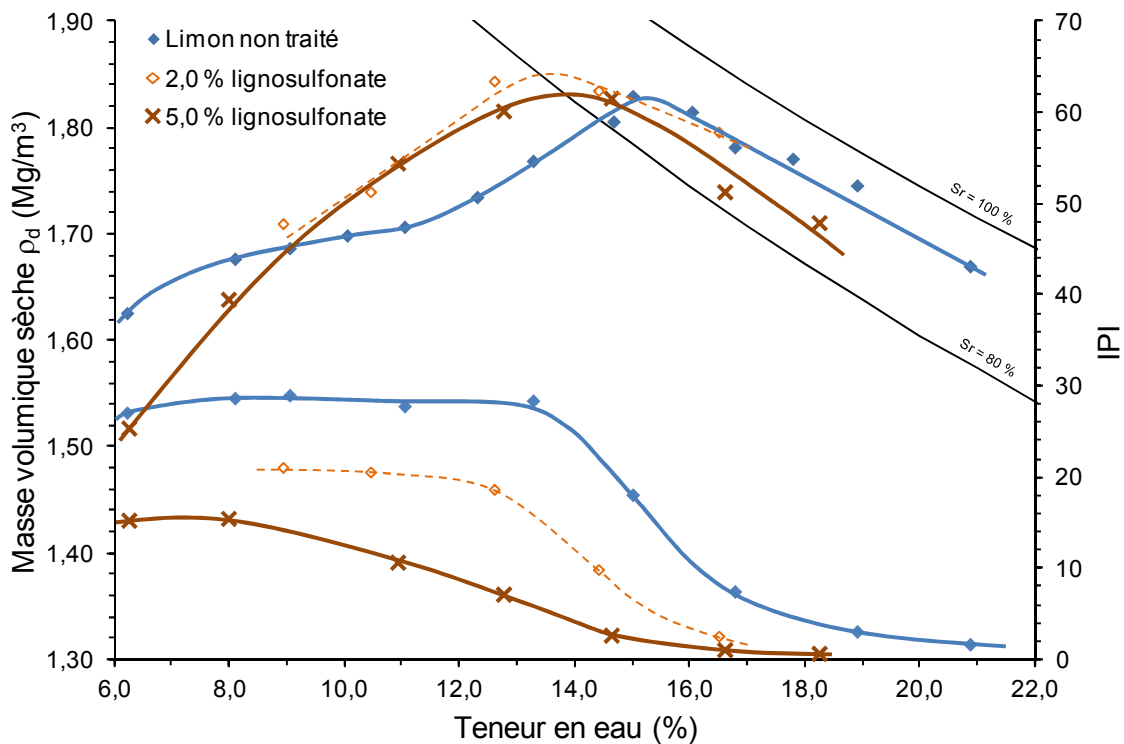


Figure III.23 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 5,0 % de lignosulfonate.

b) Influence de l'énergie de compactage

Des essais de compactage à différentes énergies inférieures à l'énergie Proctor normale ont été menés pour le limon traité à 2,0 % de lignosulfonate. Les résultats de cette étude ont montré qu'un compactage du sol traité à 75 % de l'énergie Proctor normale permettait d'atteindre les mêmes masses volumiques sèches que le sol non traité compacté à 100 % de l'énergie Proctor normale (Figure III.24).

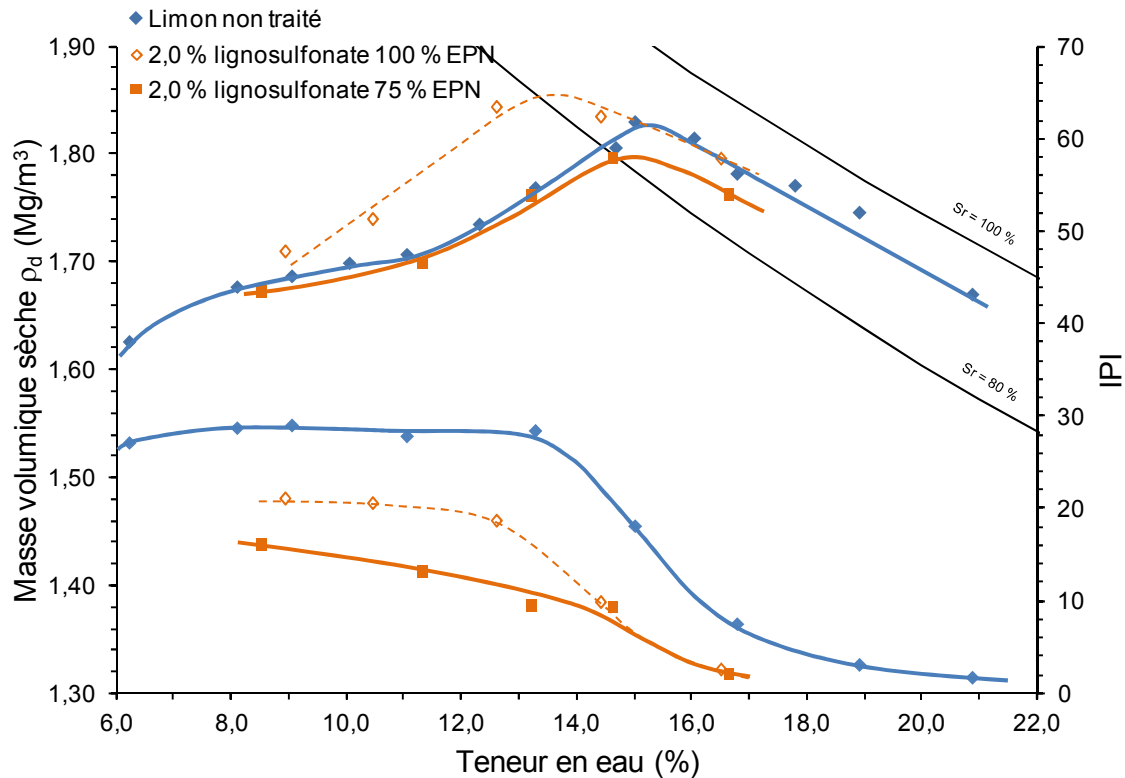


Figure III.24 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté à 75 % et 100 % de l'énergie Proctor normale (EPN).

La réduction de l'énergie de compactage s'accompagne également d'une réduction de la portance. Ainsi, l'IPI maximal mesuré est de 16 au lieu de 29 pour le sol non traité (Tableau III.8). De même, bien que les masses volumiques sèches soient identiques pour des teneurs en eau comprises entre 8 et 16 %, la portance du sol traité est au moins inférieure d'un facteur deux à celle du sol non traité.

Tableau III.8 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté à 75 et 100 % de l'EPN.

Énergie de compactage	Traitement	W_{OPN} (%)	ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	IPI_{OPN}	IPI_{max}
EPN	Non traité	15,5	1,82	15	29
	2,0 % lignosulfonate	13,5	1,85	14	21
75 % EPN	2,0 % lignosulfonate	15,0	1,80	7	16

EPN : Énergie Proctor Normale

c) Influence du temps de cure

Les lignosulfonates étant biodégradables (cf. Chapitre II), le produit est susceptible d'évoluer une fois mis en contact avec le sol. Afin d'évaluer l'effet d'une cure avant compactage, le matériau traité est laissé 28 jours en sac plastique hermétiquement fermé. Passé ce délai, le sol est compacté. Les résultats montrent que la cure préalable au compactage réduit les masses volumiques sèches atteintes et rend de ce fait le compactage moins efficace (Figure III.25).

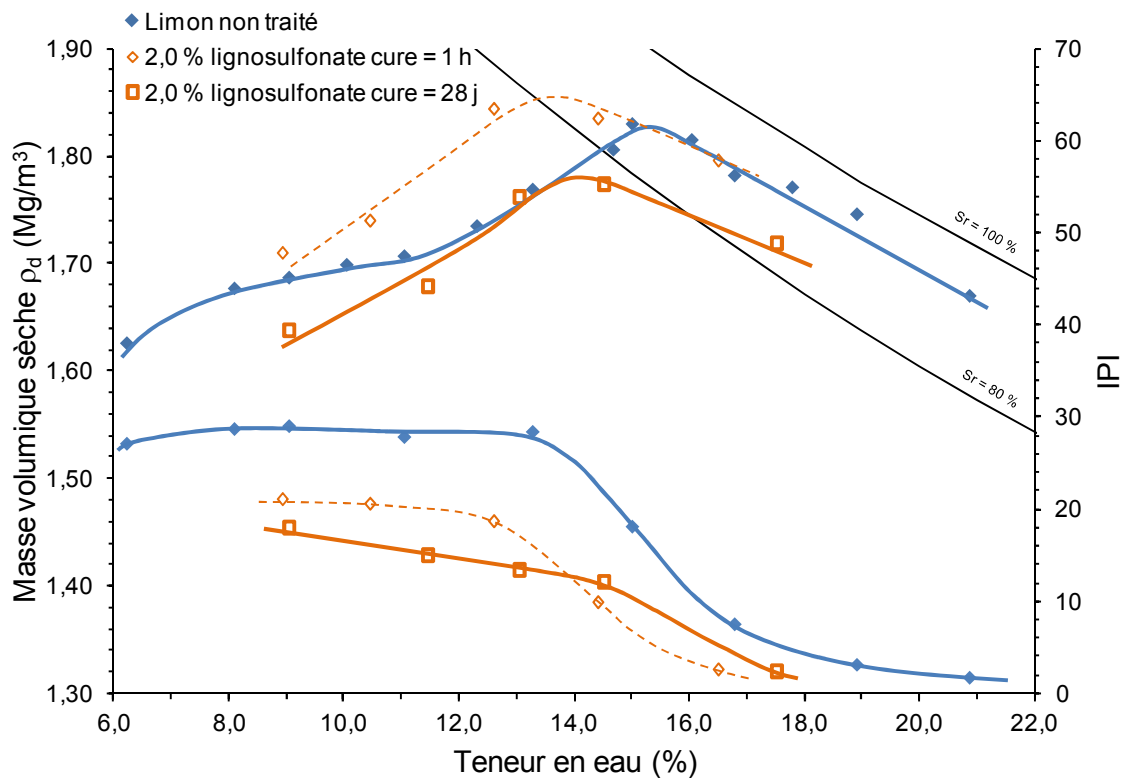


Figure III.25 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate compacté après 28 jours de cure.

d) Essai CBR en immersion

Les indices CBR et le potentiel de gonflement mesurés après 4 jours d'immersion sont inchangés par rapport aux mesures effectuées sur le sol non traité (Tableau III.9).

Tableau III.9 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.

Traitement	CBR _i	CBR _i /IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	8,8	0,42	1,0
2,0 % lignosulfonate	8,8	0,46	1,0

III.3.1.2 Résistance à la compression simple

L'influence du dosage sur la résistance à la compression simple du sol a été évaluée pour des temps de cure de 7 et 28 jours. Par ailleurs, une étude de sensibilité a permis de caractériser la résistance du sol pour différentes caractéristiques de compactage. Enfin, une comparaison entre une cure à teneur en eau constante et une cure en séchage est proposée.

a) Influence du dosage

Les résultats montrent que la résistance à la compression simple du limon traité est maximale pour un dosage de 2,0 % sans que la valeur atteinte ne dépasse celle du sol non traité. Au delà et en deçà de ce dosage, la résistance à la compression simple est réduite, parfois de façon importante. Par exemple, au dosage de 5,0 %, la résistance à la compression simple moyenne est réduite à 200 kPa au lieu de 400 kPa pour le sol non traité (Figure III.26). Par ailleurs, la valeur maximale de résistance du sol traité au lignosulfonate est égale à celle du sol non traité. Au cours du temps, aucune évolution n'est observée.

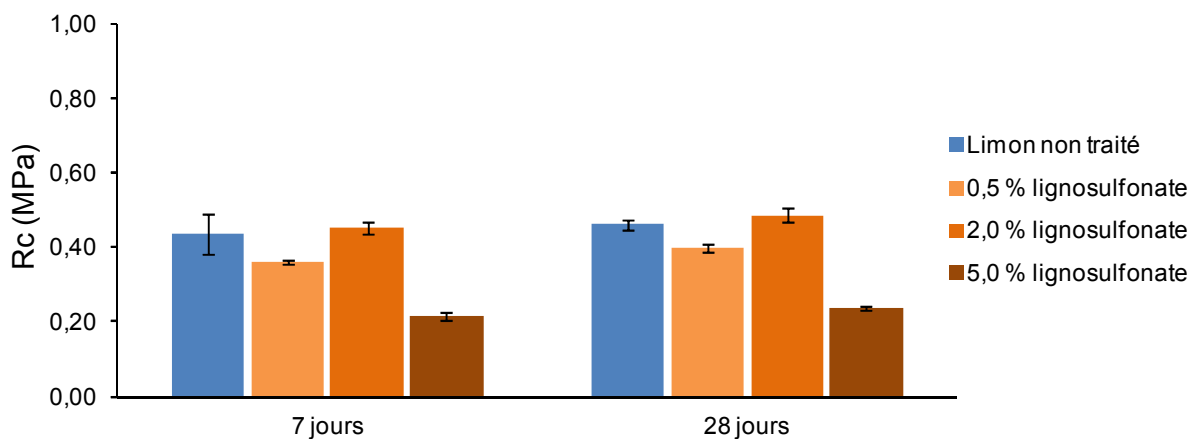


Figure III.26 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,5 ; 2,0 et 5,0 % de lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.

b) Influence des références de compactage

La résistance à la compression simple du sol traité à 2,0 % de lignosulfonate a été mesurée pour différentes références de compactage. Il a ainsi été mis en évidence que le sol traité est généralement moins résistant que le sol non traité y compris lorsque les références de compactage des éprouvettes sont identiques.

c) Influence des conditions de cure

Les résultats publiés par Santoni *et al.* (2002) et Tingle & Santoni (2003), montrent que les plus fortes améliorations de résistance à la compression simple de matériaux traités au lignosulfonate sont observées pour des cures au cours desquelles les matériaux sont laissés sécher. Afin d'étudier en quelle proportion un séchage du sol modifiait la résistance du sol traité, deux modes de cure ont été testés : une cure « humide » conservant la teneur en eau des éprouvettes, et une cure en « séchage »

pour laquelle les éprouvettes sont placées dans une salle climatisée à 20°C dont l'humidité relative est comprise entre 50 et 60 %.

La cinétique de séchage est suivie par pesée ce qui permet de suivre l'évolution de la teneur en eau moyenne (w) du lot de trois éprouvettes. Cette valeur est ensuite comparée à la teneur en eau initiale moyenne (w_i). Le suivi est effectué jusqu'à stabilisation de la masse, puis la résistance à la compression simple est mesurée.

Les résultats montrent que la présence de lignosulfonate ralentit l'évaporation de l'eau notamment dans les premières heures de séchage (Figure III.27a). La cure en séchage a pour effet d'augmenter les résistances à la compression simple d'un facteur 10. Cependant, le traitement au lignosulfonate confère au sol une augmentation supplémentaire d'environ un tiers de la résistance par rapport à celle du limon non traité (Figure III.27b).

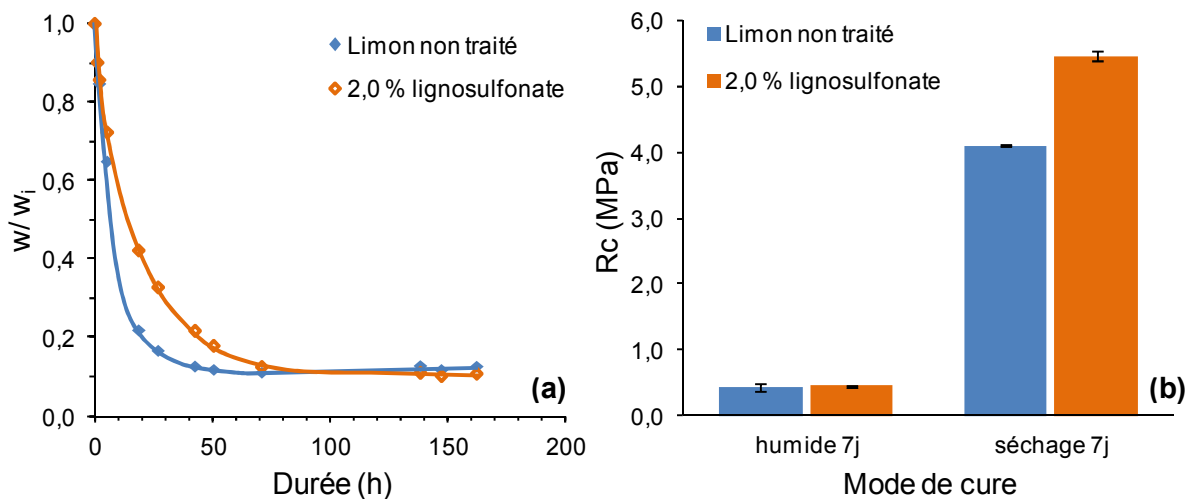


Figure III.27 : Évolution de la teneur en eau des éprouvettes de limon traité à 2,0 % de lignosulfonate au cours du séchage (a), et résistance à la compression simple en fonction du mode de cure (b).

III.3.1.3 Gonflement et conductivité hydraulique

Pour l'ensemble des éprouvettes, traitées ou non, les potentiels de gonflement sont faibles, inférieurs à 5 %. Aucun effet du traitement sur le gonflement n'est observé (Figure III.28).

Les coefficients de perméabilité mesurés pour les éprouvettes compactées à l'optimum (points A et B) sont de $2,4 \cdot 10^{-8}$ m/s pour le sol traité contre $4,0 \cdot 10^{-8}$ m/s sans traitement (Figure III.28). De même, du côté sec (point D), les valeurs obtenues à teneurs en eau et masses volumiques sèches identiques sont de $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s pour le sol non traité, soit 2,5 fois plus que l'éprouvette traitée ($6,6 \cdot 10^{-8}$ m/s).

Les résultats obtenus donnent des coefficients de perméabilité pouvant être modifiés d'un facteur 2 à 3 entre éprouvettes traitées et non traitées. Ces modifications ne revêtent cependant pas de caractère significatif compte tenu du nombre d'essais

réalisés et des incertitudes expérimentales liées à ce type de mesure. Il peut toutefois être souligné que du côté sec de l'optimum ($w = 12\%$), à énergie de compactage donnée, le sol traité est moins perméable que le sol non traité. Les coefficients de perméabilité sont alors de $6,6 \cdot 10^{-8}$ m/s pour le sol traité soit 12 fois moins que le sol non traité ($7,7 \cdot 10^{-7}$ m/s, point C). Cet écart s'explique par le fait qu'une masse volumique sèche plus élevée réduit la conductivité hydraulique du sol.

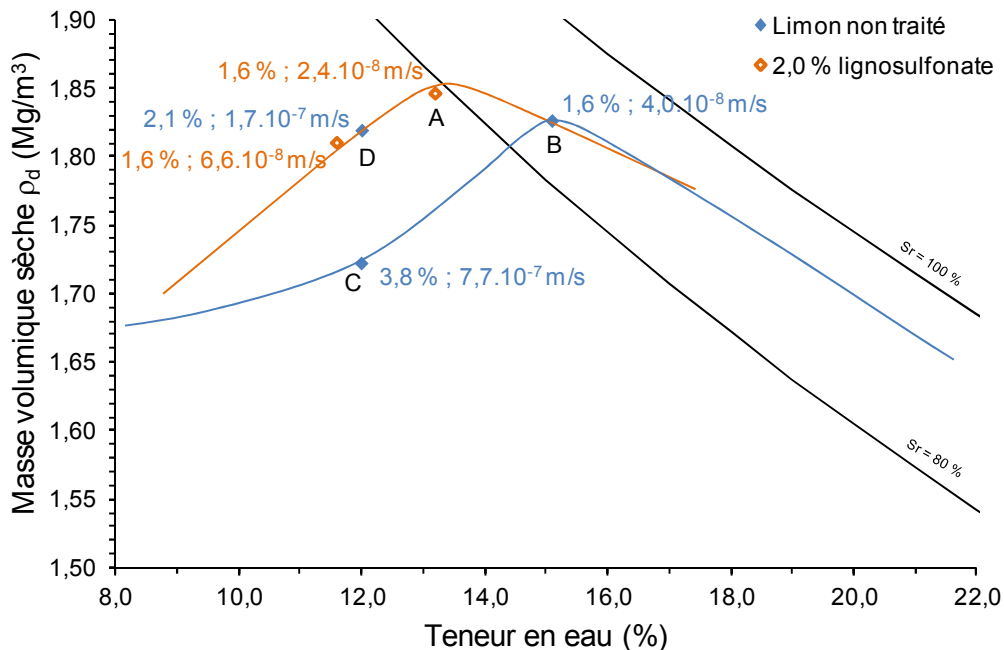


Figure III.28 : Potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate en fonction des caractéristiques de compactage.

III.3.1.4 Caractéristiques d'identification

L'effet des trois dosages en lignosulfonate a été évalué sur la valeur au bleu de méthylène et les indices de plasticité du limon.

a) Valeur au bleu de méthylène

Les valeurs mesurées après 7 et 28 jours de cure sont comprises entre 2,2 et 3,6 g/100g de sol sec (Tableau III.10) et encadrent donc la VBS du sol non traité (3,1 g/100 g). Au cours du temps, aucune évolution significative n'est relevée.

Tableau III.10 : Valeur d'adsorption au bleu de méthylène du limon traité à différents dosages en lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.

Temps de cure (j)	VBS limon + lignosulfonate		
	0,5 %	2,0 %	5,0 %
7	3,6	3,4	2,6
28	2,8	3,4	2,2

VBS limon non traité : 3,1 g/100 g

b) Indices de plasticité

Pour les trois dosages étudiés, l'apport de lignosulfonate réduit les limites de liquidité et de plasticité de façon croissante avec le dosage. L'indice de plasticité n'est cependant pas affecté (Figure III.29).

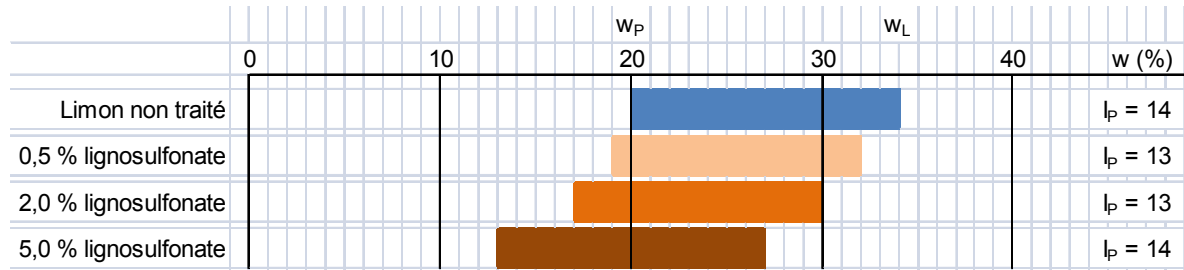


Figure III.29 : Indices de plasticité du limon traité à différents dosages en lignosulfonate.

Le pH du limon est réduit par l'ajout de lignosulfonate (Tableau III.11). Pour le dosage le plus élevé (5,0 %), le pH est réduit d'environ une unité.

Tableau III.11 : Évolution du pH du limon en fonction du dosage en lignosulfonate.

Non traité	Lignosulfonate		
	0,5 %	2,0 %	5,0 %
9,2	8,8	8,4	8,1

III.3.1.5 Microstructure du limon traité

L'observation de la microstructure au MEB montre que le sol présente des structures en forme de fibres (flèches sur la Figure III.30b). La nature de ces fibres ne peut toutefois pas être déterminée par spectrométrie X du fait de leur taille trop restreinte. Il pourrait cependant s'agir de lignosulfonates.

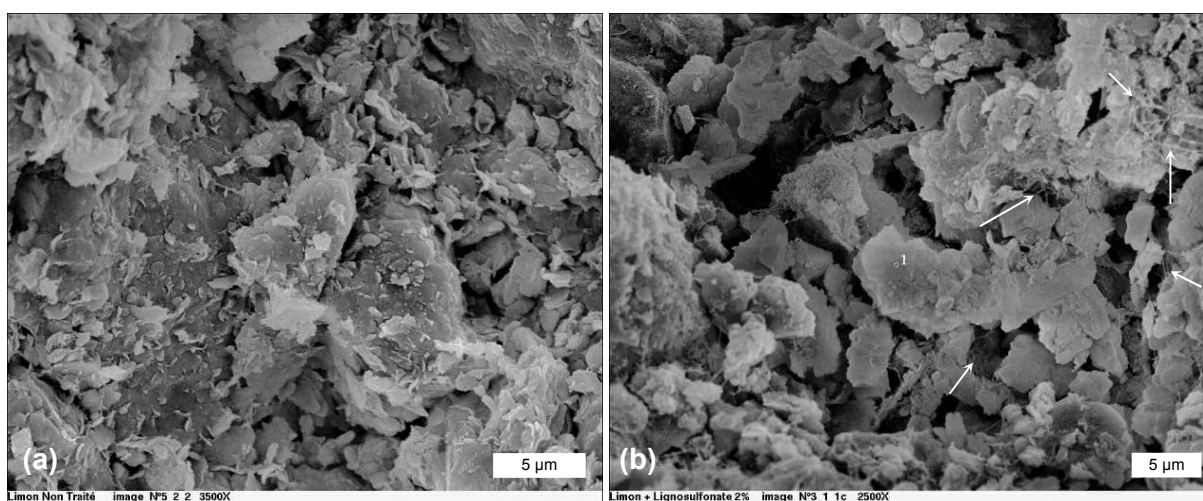


Figure III.30 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 2,0 % de lignosulfonate (b).

L'image présentée montre également des pores entre agrégats plus larges que ceux observés pour le sol non traité. Par ailleurs, les minéraux argileux de grande taille sont orientés préférentiellement faces contre faces.

L'étude par porosimétrie montre que le volume total injecté dans l'échantillon traité est inférieur à celui injecté dans l'échantillon non traité (Figure III.31). Cette différence s'explique par la plus grande masse volumique sèche de l'échantillon traité, $\rho_d = 1,86 \text{ Mg/m}^3$ au lieu de $1,83 \text{ Mg/m}^3$ pour l'échantillon non traité.

La courbe de distribution des pores est également modifiée. De manière générale, la fréquence des pores de rayons inférieurs à $0,3 \mu\text{m}$ est réduite au profit d'une augmentation des pores de rayons compris entre $0,3 \mu\text{m}$ et $5,0 \mu\text{m}$. Les pores de tailles supérieures à $5,0 \mu\text{m}$ ne sont pas affectés (Figure III.31).

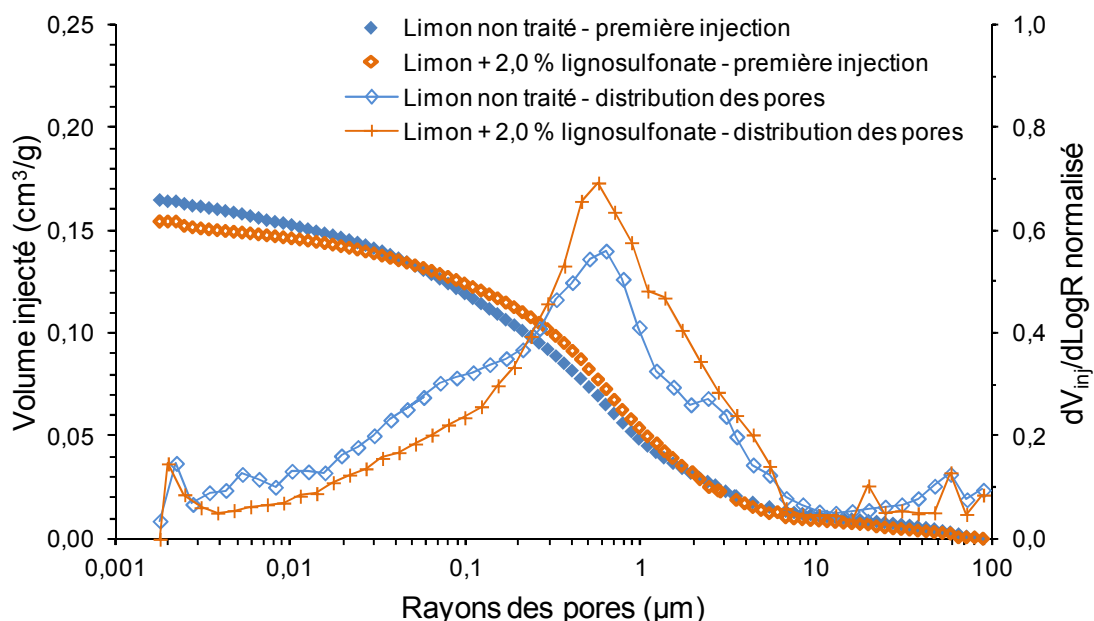


Figure III.31 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.

III.3.1.6 Effet d'une association avec du ciment

L'effet de l'association entre un traitement au ciment et un traitement au lignosulfonate a été étudié. Les effets sur les propriétés de compactage (Tableau III.7) et sur l'évolution de la résistance à la compression simple (Figure III.32) sont présentés dans cette partie.

Lors des opérations de traitement, l'ajout du lignosulfonate suit directement celle du ciment. Une fois le mélange effectué, une période de repos de 20 à 30 minutes est respectée. Les dosages appliqués sont de 6,0 % de ciment et 2,0 % de lignosulfonate.

Les résultats obtenus montrent que lorsque le traitement au ciment est directement suivi par l'ajout de 2,0 % de lignosulfonate, la teneur en eau optimale de compactage

augmente et la masse volumique sèche maximale diminue à la fois par rapport au traitement au ciment seul et par rapport au sol non traité (Tableau III.7). L'ajout de lignosulfonate a également pour effet de réduire la portance du sol par rapport au traitement au ciment seul. À titre d'exemple, l'IPI mesuré à l'optimum est alors de 10 contre 24 pour le traitement au ciment seul (Tableau III.7).

Tableau III.12 : Caractéristiques de compactage et de portance du limon traité à 6 % de ciment et à 6 % de ciment + 2,0 % de lignosulfonate.

Caractéristique	Non traité	6 % ciment	6 % ciment + 2,0 % lignosulfonate
W_{OPN} (%)	15,5	15,5	17,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,82	1,79	1,76
IPI_{OPN}	15	24	10
IPI_{max}	29	32	22

En complément des données de compactage, la résistance à la compression simple a été mesurée après 7, 28 et 90 jours de cure. Les résultats montrent que la résistance à la compression simple est fortement réduite par le traitement au ciment + lignosulfonate (Figure III.32). À 90 jours, la résistance du sol est alors de 1,1 MPa au lieu de 4,9 MPa pour le ciment seul.

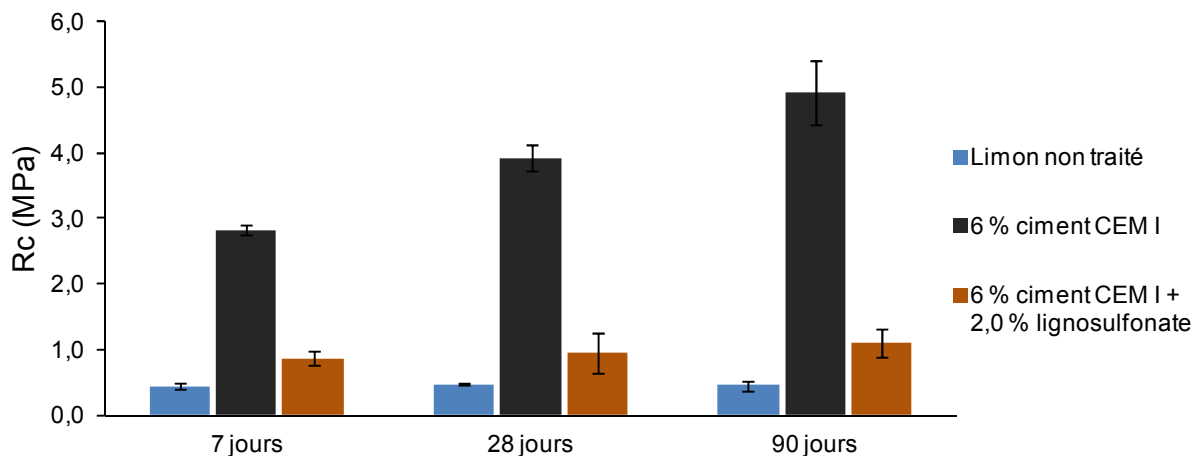


Figure III.32 : Évolution des résistances à la compression simple du limon traité à 6 % de ciment et à 6,0 % de ciment + 2,0 % de lignosulfonate.

En conclusion, l'ajout de lignosulfonate après traitement au ciment a pour principal effet d'accentuer la réduction de la masse volumique sèche maximale et d'augmenter la teneur en eau optimale de compactage. Le traitement s'accompagne également d'une réduction de la portance et d'une inhibition de la prise y compris pour des temps de cure longs.

III.3.2 Traitement de l'argile de Couthenans

À l'instar du limon, l'argile de Couthenans a été traitée avec les trois dosages en lignosulfonate. Les propriétés de compactage, résistance à la compression simple et caractéristiques d'identification sont présentées dans cette partie.

III.3.2.1 Propriétés de compactage

L'influence du traitement sur les propriétés de compactage a été évaluée pour les trois dosages retenus. Des essais en immersion ont quant à eux été menés pour le dosage intermédiaire de 2,0 %.

a) Compactage Proctor normal

Les résultats des essais de compactage à l'énergie Proctor normale montrent que les propriétés de compactage sont sensibles au dosage. Après un apport de 0,5 % de lignosulfonate, la courbe de compactage n'est pas affectée. Cependant, les dosages de 2,0 et 5,0 % conduisent à réduire les masses volumiques sèches atteintes en particulier pour les teneurs en eau inférieures à la teneur en eau optimale de compactage (Figure III.33). Pour les trois dosages, les teneurs en eau optimales sont comprises entre 22,0 et 23,0 % et les masses volumiques sèches maximales entre 1,56 et 1,59 Mg/m³ (Tableau III.13).

Le traitement au lignosulfonate s'accompagne aussi d'une réduction de la portance observée pour l'ensemble des dosages testés. Plus le dosage est élevé, plus la réduction est importante. Au dosage de 5,0 %, la portance est réduite à 5 au lieu de 11 pour le sol non traité (Tableau III.13).

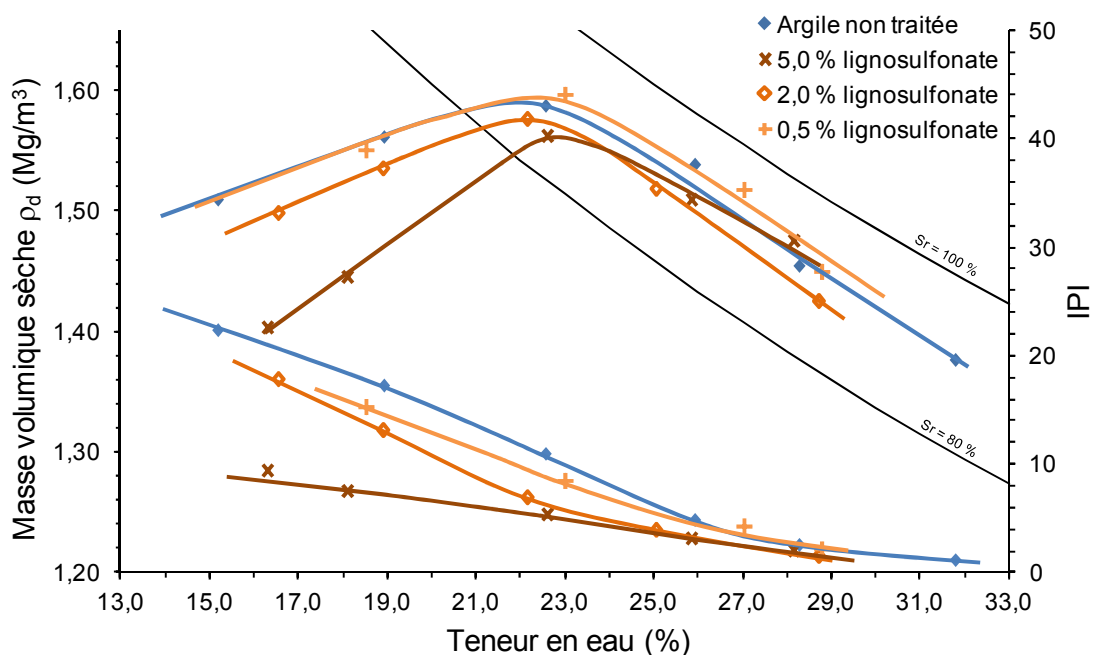


Figure III.33 : Courbes de compactage et de portance de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.

Tableau III.13 : Caractéristiques de compactage et de portance de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.

Caractéristique	Non traitée	Lignosulfonate		
		0,5 %	2,0 %	5,0 %
w_{OPN} (%)	22,0	22,5	22,0	23,0
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,59	1,59	1,57	1,56
IPI_{OPN}	12	9	7	5

b) Essais CBR en immersion

Après quatre jours d'immersion, l'indice CBR mesuré pour l'échantillon traité est très faible (1,1) identique à celui du sol non traité. Les gonflements mesurés sont également proches (Tableau III.14). Toutefois, à la fin de l'essai, le gonflement n'est pas stabilisé.

Tableau III.14 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du limon traité à 2,0 % de lignosulfonate.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	0,9	0,08	3,7
2,0 % lignosulfonate	1,1	0,18	3,2

III.3.2.2 Résistance à la compression simple

L'influence du dosage sur la résistance à la compression simple de l'argile a été évaluée. Deux modes de cure ont également été testés pour le dosage de 2,0 % : une cure humide à teneur en eau constante et une cure en séchage.

a) Influence du dosage

Les résistances à la compression simple mesurées sur des lots d'éprouvettes compactées à l'optimum Proctor normal respectif de chaque dosage montrent que le traitement réduit les valeurs mesurées après 7 et 28 jours de cure (Figure III.34). Par ailleurs, aucune évolution n'est observée au cours du temps.

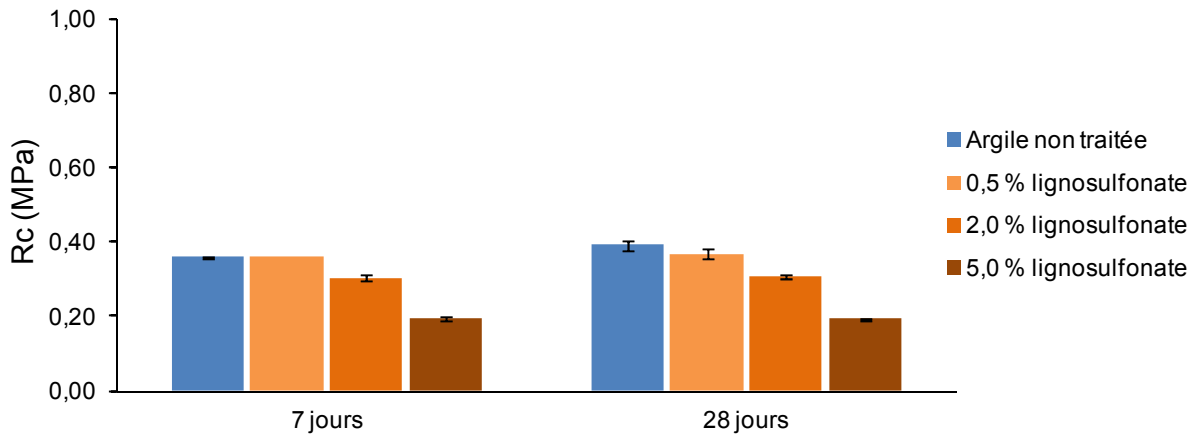


Figure III.34 : Résistance à la compression simple du limon traité à 0,5 ; 2,0 et 5,0 % de lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.

b) Influence du mode de cure

Lorsque les éprouvettes d'argile traitée sèchent, leur résistance augmente. Cette augmentation est accentuée par la présence de lignosulfonate. En effet, après 7 jours de cure, la résistance moyenne des éprouvettes traitées est de 4,2 MPa au lieu de 3,2 MPa pour le sol non traité (Figure III.35).

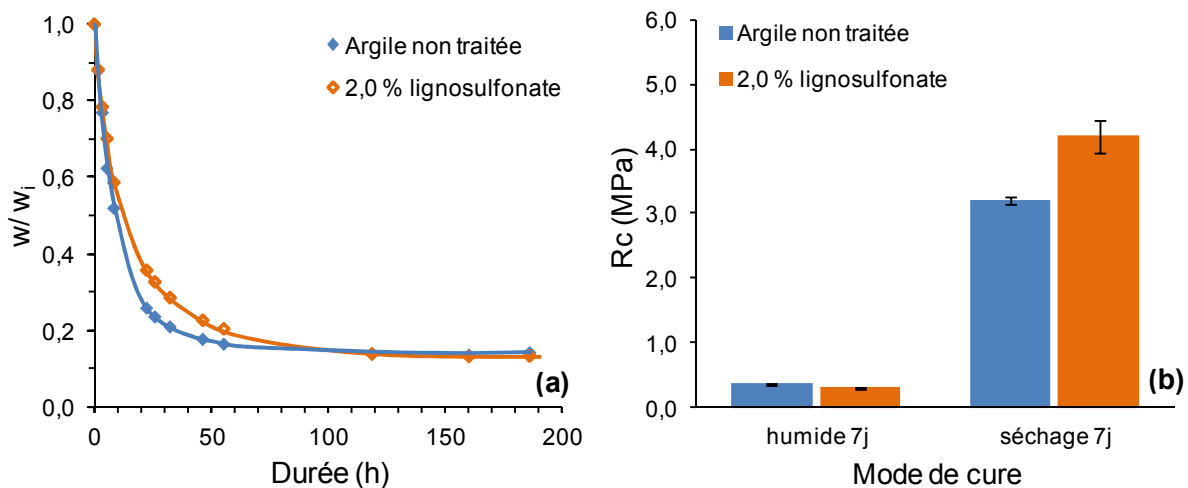


Figure III.35 : Teneur en eau des éprouvettes d'argile traitée à 2,0 % de lignosulfonate au cours du séchage (a), et résistance à la compression simple selon le mode de cure (b).

III.3.2.3 Potentiel de gonflement et conductivité hydraulique

Les éprouvettes d'argile montrent un gonflement légèrement plus élevé après traitement à 2,0 % de lignosulfonate et présentent des coefficients de conductivité hydrauliques identiques (Tableau III.15). Le potentiel de gonflement plus élevé observé après traitement est expliqué par la teneur en eau initiale plus faible de l'éprouvette.

Tableau III.15 : Caractéristiques de compactage, potentiel de gonflement et coefficient de perméabilité de l'argile traitée à 2,0 % de lignosulfonate.

Traitement	w (%)	ρ_d (Mg/m ³)	$\Delta H/H_0$ (%)	k (m/s)
Non traité	23,0	1,60	9,4	$7,5 \cdot 10^{-9}$
0,002 % Permazyme	20,7	1,60	11,3	$7,6 \cdot 10^{-9}$

III.3.2.4 Caractéristiques d'identification

L'effet des trois dosages en lignosulfonate a été évalué sur la valeur au bleu de méthylène et les indices de plasticité de l'argile.

a) Valeur au bleu de méthylène

Les valeurs mesurées après 7 et 28 jours de cure sont comprises entre 6,3 et 7,5 g/100g de sol sec (Tableau III.16). Les valeurs sont de ce fait légèrement supérieures à la VBS du sol non traité (6,4 g/100g). Au cours du temps, aucune évolution significative n'est relevée.

Tableau III.16 : Valeur d'adsorption au bleu de méthylène de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate après 7 et 28 jours de cure.

Temps de cure (j)	VBS argile + lignosulfonate		
	0,5 %	2,0 %	5,0 %
7	7,1	7,0	7,5
28	6,9	6,3	7,5

VBS argile non traitée : 6,4 g/100 g

b) Indices de plasticité

Le traitement au lignosulfonate modifie les caractéristiques d'identification de l'argile. La limite de liquidité a tendance à diminuer, passant de 59 % pour le sol non traité à 48 % après ajout de 5,0 % de lignosulfonate (Figure III.36). La limite de plasticité suit également cette tendance mais de façon moins marquée. Les effets du traitement sur les limites d'Atterberg du sol conduisent à une réduction de l'indice de plasticité de l'argile de 32 à 25 pour le dosage le plus élevé.

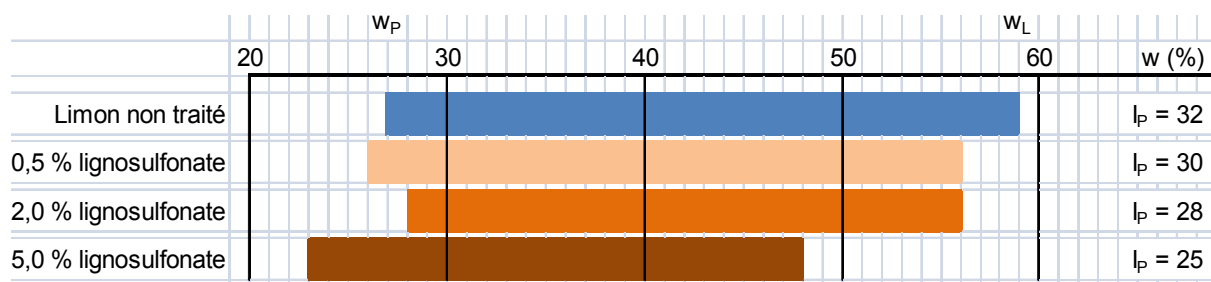


Figure III.36 : Indices de plasticité de l'argile traitée à différents dosages en lignosulfonate.

Le pH de l'argile est réduit par l'ajout de lignosulfonate. Pour le dosage le plus élevé (5,0 %), le pH est réduit d'un peu plus d'une unité par rapport au sol non traité (Tableau III.17).

Tableau III.17 : Évolution du pH de l'argile en fonction du dosage en lignosulfonate.

Non traité	Lignosulfonate		
	0,5 %	2,0 %	5,0 %
6,6	6,5	5,9	5,4

III.3.3 Traitement de sables

Afin de tester la sensibilité des effets du traitement par rapport à la nature des sols, deux matériaux sableux ont été traités à 2,0 % de lignosulfonate. Les résultats obtenus lors des essais de compactage et des mesures de portance sont présentés dans les paragraphes suivants.

Le traitement du sable B5 au lignosulfonate tend à déplacer la courbe de compactage vers le côté sec (Figure III.37). Ainsi, la teneur en eau optimale est réduite de 8,5 à 7,5 %. Pour des teneurs en eau supérieures à w_{OPN} , les masses volumiques sèches atteintes sont fortement réduites par rapport au sol non traité.

La portance du sable est dégradée par le traitement en particulier à la teneur en eau optimale de compactage où l'IPI mesuré est de 4 au lieu de 15 pour le sol non traité.

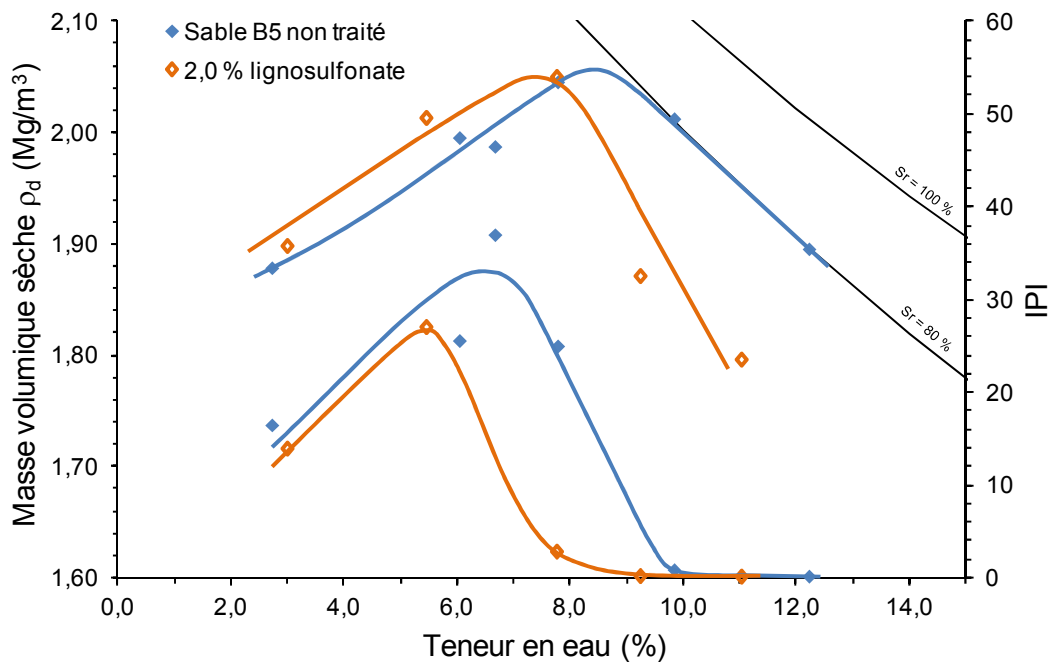


Figure III.37 : Courbes de compactage et de portance du sable B5 traité à 2,0 % de lignosulfonate.

Pour le sable homogénéique, la courbe de compactage ne se présente pas sous forme de cloche du fait de l'homogénéité des diamètres des grains le constituant. Cependant, l'apport de lignosulfonate augmente les masses volumiques sèches atteintes indépendamment de la teneur en eau (Figure III.38). La portance quant à elle n'est pas affectée.

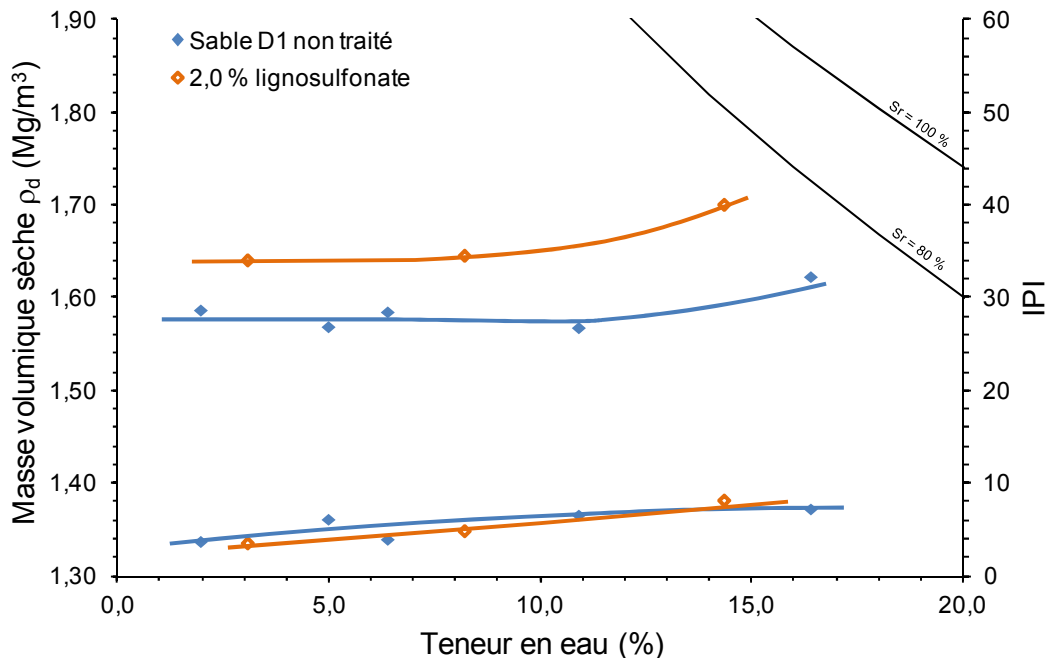


Figure III.38 : Courbes de compactage et de portance du sable D1 traité à 2,0 % de lignosulfonate.

Une partie de l'augmentation de la masse volumique sèche peut être attribuée à la présence du lignosulfonate dans le sol à hauteur de 2,0 %. Dans le cas du sable D1, cette quantité correspond à environ $0,03 \text{ Mg/m}^3$ ce qui est toutefois insuffisant pour expliquer la totalité de l'augmentation observée signifiant que le traitement permet aux grains de sable d'acquérir une configuration plus dense.

III.3.4 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie

Le comportement au compactage des sols traités diffère selon leur nature. Pour le limon et le sable B5, la tendance est à la réduction de la teneur en eau optimale de compactage accompagnée d'une augmentation de la masse volumique sèche maximale fonction du dosage. Un phénomène similaire est rapporté par Gow *et al.* 1961. Toutefois, pour l'argile, le traitement conduit au contraire à réduire les masses volumiques sèches atteintes sans modifier grandement la teneur en eau optimale de compactage. À l'instar des résultats des études publiées par Tingle & Santoni (2003) et Santoni *et al.* (2002), l'existence d'un dosage maximisant la résistance à la compression simple du limon est observée. Cependant, le dosage optimal est ici de 2,0 % contre 5,0 % pour les deux études citées. Au contraire, dans le cas de l'argile,

le traitement se solde par une réduction systématique de la résistance à la compression simple induite par l'augmentation du dosage.

La portance est également affectée par le traitement. Cependant, Gow *et al.* (1961) ont montré que le traitement améliorerait la portance du sol traité notamment pour des dosages faibles. Ce résultat est en contradiction avec les observations réalisées montrant une réduction quasi systématique de la portance. Toutefois, à l'image des résultats obtenus dans cette étude, les auteurs ont également montré que plus le dosage était élevé, moins la portance était grande. Les causes d'une telle observation sont vraisemblablement à rechercher du côté de la composition des produits.

III.3.5 Recherche des mécanismes d'action

Les lignosulfonates possèdent de nombreuses propriétés pouvant modifier le comportement des sols et l'organisation des minéraux argileux. Certaines propriétés sont dépendantes de la teneur en eau du milieu. Les lignosulfonates sont ainsi dispersants dans des milieux à fortes teneurs en eau et au contraire liants à faibles teneurs en eau. Ce phénomène est particulièrement bien illustré par les mesures de résistances à la compression simple après séchage. Pour le limon et l'argile, les éprouvettes sont alors environ 30 % plus résistantes par rapport aux lots non traités témoignant de l'effet liant du lignosulfonate. Par ailleurs, les lignosulfonates ont également montré leur capacité à retarder le séchage des éprouvettes, phénomène déjà mis en évidence par Gow *et al.* (1961). Toutefois, l'effet observé est transitoire car à l'issue des 7 jours de cure, les teneurs en eau des éprouvettes étaient toutes identiques.

Lors des essais de caractérisation des limites d'Atterberg, la tendance observée est à la réduction des limites de liquidité et de plasticité. La réduction de la limite de liquidité témoigne d'une réduction des forces liant les particules du sol suite au traitement. Lambe (1956) explique ce phénomène par les propriétés dispersantes des lignosulfonates. Au contraire, la réduction de la limite de plasticité peut, quant à elle, être expliquée par les propriétés liantes du lignosulfonate car lorsque la teneur en eau est réduite, les molécules ont tendance à lier les grains du sol ce qui a pour effet d'augmenter la cohésion. Lors de la mesure de la limite de plasticité par la méthode du rouleau, la rupture se produit alors à une teneur en eau plus faible. Cet effet induit une réduction de la limite de plasticité.

À l'instar du traitement à la Permazyme, la mesure de la tension superficielle de solutions aqueuses de lignosulfonate indique des réductions importantes de la tension superficielle (Figure III.39). Toutefois, ce phénomène ne permet pas d'expliquer la dépendance des résultats vis-à-vis du dosage en lignosulfonate. Les caractéristiques mécaniques du produit doivent elles-mêmes entrer en jeu notamment lorsque les dosages sont élevés. Une partie de la réduction de la portance pourrait être attribuée à la formation d'un film de lignosulfonate hydraté

entourant les agrégats du sol. En augmentant la lubrification, leur aptitude à se déplacer les uns par rapport aux autres sous chargement mécanique serait accrue entraînant une réduction de la portance. Une illustration de la formation d'un tel film est donnée pour l'argile (Figure III.40). Les zones les plus foncées de la photo correspondent à la présence de quantités plus élevées de lignosulfonate.

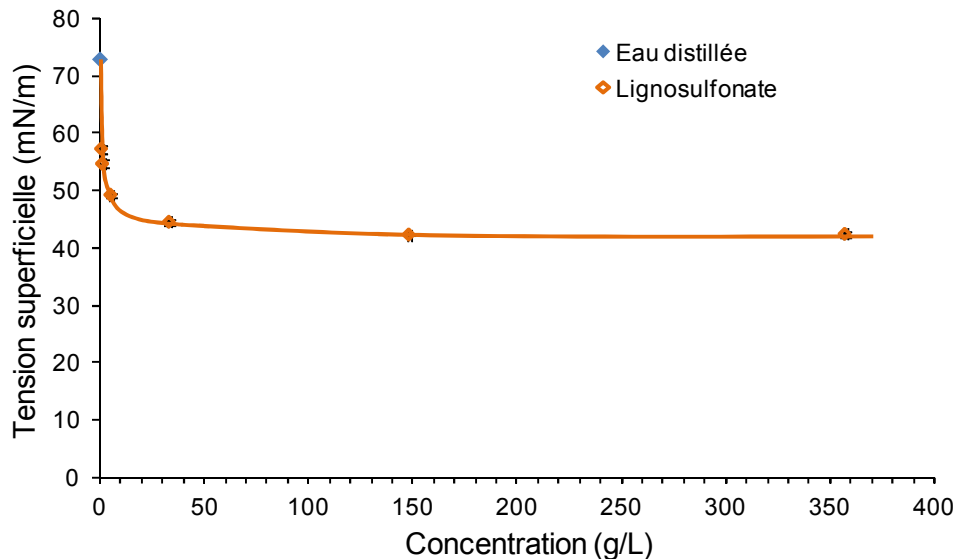


Figure III.39 : Tension superficielle d'une solution aqueuse de lignosulfonate à différentes concentrations massiques.

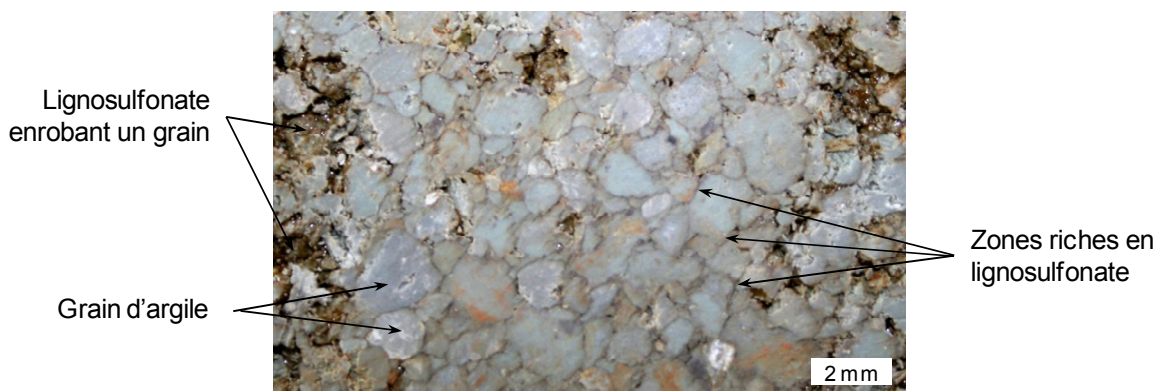


Figure III.40 : Vue de la surface arasée après compactage de l'argile traitée à 5,0 % de lignosulfonate.

Les observations au MEB et par porosimétrie au mercure témoignent des modifications induites par le traitement. Les pores de plus petites tailles voient leur diamètre réduit, probablement du fait du colmatage par les lignosulfonates quand ceux de tailles plus importantes ont des diamètres qui augmentent vraisemblablement du fait du phénomène de dispersion des minéraux argileux. Les données obtenues au MEB et celles relative à l'évolution des résistances à la compression simple au cours du temps montrent que le traitement n'induit pas de changement dans la minéralogie du sol et n'induit pas de réaction de prise. Par contre, lorsqu'ils sont mélangés à du ciment, les lignosulfonates ont pour effet d'inhiber les phénomènes de prise. Cette action observée par ailleurs, trouve une

explication dans l'adsorption des lignosulfonates sur les composés cimentaires en formation, en particulier les aluminates tricalciques (C_3A) ce qui inhiberait leur hydratation (Ramachandran 1995 ; Bishop & Barren, 2006).

III.3.6 Apport technique et implications environnementales

Les données factuelles acquises pour le traitement au lignosulfonate associées à la recherche d'un mécanisme d'action permettent de définir certaines applications, d'en déduire les principales implications environnementales, de fournir des recommandations d'utilisations et de discuter de l'évolution des structures compactées au cours du temps.

III.3.6.1 Applications potentielles du traitement

Les résultats obtenus divergent en fonction des sols traités. Pour l'argile le traitement n'apporte aucun avantage particulier lors de la mise en œuvre du matériau. Au contraire, ses propriétés mécaniques sont dégradées. De même, pour le sable B5, le traitement ne change pas de façon conséquente la courbe de compactage et réduit la portance du sol. Seul le traitement du limon à 2,0 % de lignosulfonate conduit à des applications intéressantes du fait de l'augmentation de la masse volumique sèche du sol, les autres propriétés mécaniques étant peu affectées par ailleurs. Cependant, lorsque le traitement au lignosulfonate est associé à un traitement au ciment, l'effet de prise est inhibé. Ainsi, ce type d'association ne présente pas d'application intéressante.

Les applications pour le limon traité nécessitent toutefois que le sol soit à une teneur en eau initiale située du côté sec de l'optimum. En effet, pour des teneurs en eau plus importantes, les propriétés mécaniques du sol traité ne sont pas améliorées et la réduction de la portance causée par le traitement ne permet pas d'assurer une traficabilité satisfaisante.

Plusieurs situations de mise en œuvre sont envisagées. Chacune permet de répondre à un objectif de compactage correspondant à une masse volumique sèche minimale de $1,78 \text{ Mg/m}^3$. La teneur en eau initiale considérée est de 9,0 %.

- La première situation considère un compactage à l'énergie Proctor normale, le sol non traité doit alors être humidifié jusqu'à une teneur en eau de 14 % (Figure III.41). Dans le cas du traitement à 2,0 % de lignosulfonate, le compactage peut avoir lieu à une teneur en eau de 11,5 % soit 2,5 % inférieure ce qui représente une économie d'eau de $45 \text{ m}^3 / 1000 \text{ m}^3$ de sol compacté.
- La seconde situation considère le cas où la teneur en eau finale de mise en œuvre est égale pour les deux variantes ($w = 11,5 \%$). Dans ce cas, le sol non traité doit être compacté plus fortement (Figure III.42). Selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000), une augmentation de 70 % de l'énergie ($0,4 \text{ MJ/m}^3$) est alors

nécessaire pour atteindre la masse volumique sèche requise. Le traitement permet dans ce cas de limiter la consommation d'énergie de compactage.

- La troisième situation de mise en œuvre (Figure III.43) consiste à compacter le sol sans modifier sa teneur en eau. Une énergie importante doit alors être apportée en plus de l'énergie Proctor normale. Le traitement permettrait alors de limiter l'énergie de compactage investie.

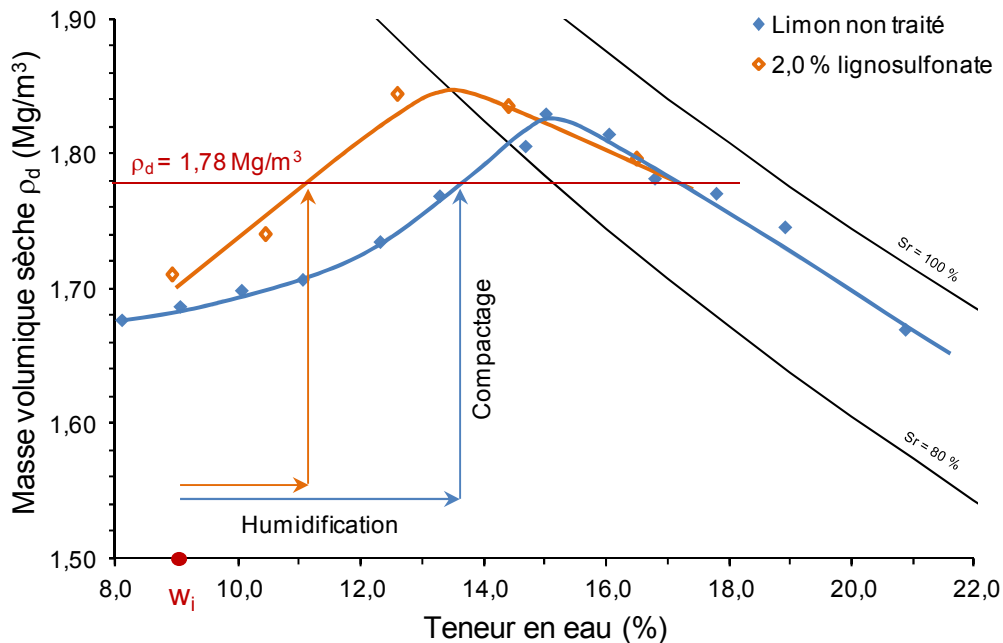


Figure III.41 : Situation de mise en œuvre n°1 ; le limon est humidifié puis compacté à l'énergie Proctor normale.

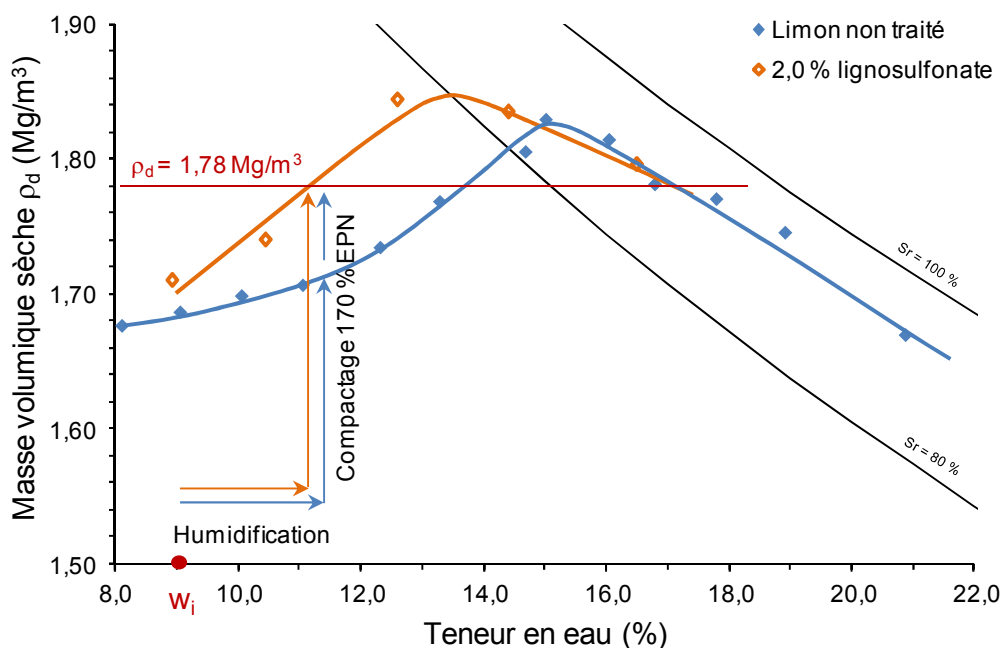


Figure III.42 : Situation de mise en œuvre n°2 ; le limon est humidifié à une teneur en eau finale donnée puis compacté à l'énergie requise pour atteindre la masse volumique sèche visée.

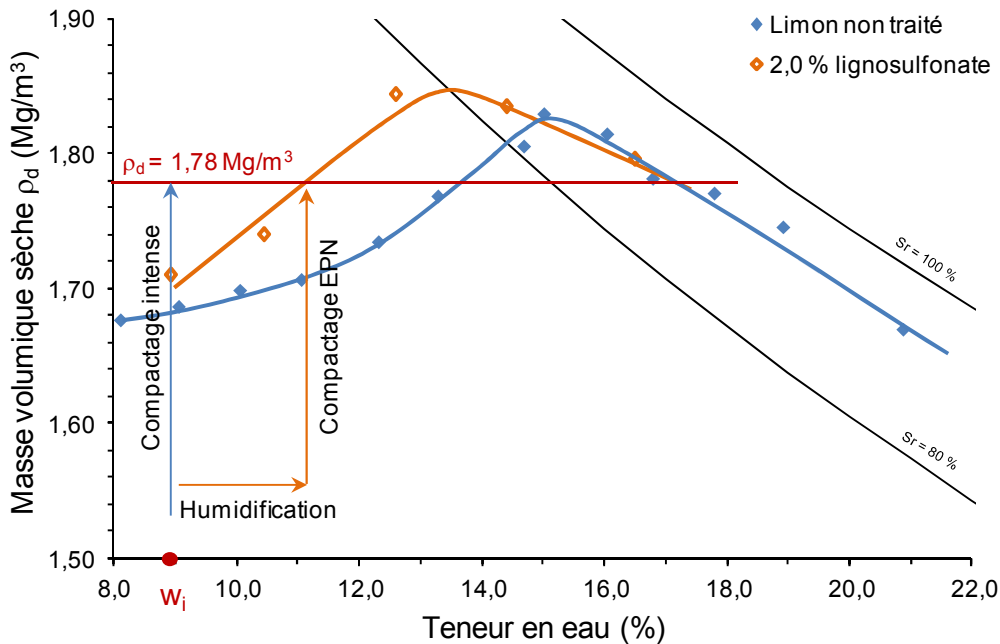


Figure III.43 : Situation de mise en œuvre n°3 ; le limon non traité est compacté intensément à sa teneur en eau in situ, ou traité et compacté à l'énergie Proctor normale.

III.3.6.2 Implications environnementales

Pour les différentes situations détaillées précédemment, des économies d'eau ou d'énergie de compactage peuvent être attendues lors de la phase de mise en œuvre du sol traité.

Au cours de la vie de la structure, la dégradation du produit de traitement peut toutefois avoir un impact sur l'environnement. En effet, la biodégradation libère du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂ par exemple. De même, le soufre des fonctions sulfonates pourrait être libéré dans l'environnement sous forme de dioxyde de soufre ou de sulfates.

Les lignosulfonates sont également solubles dans l'eau et facilement lessivables. Compte tenu des dosages employés (2,0 % représentent 36 t / 1000 m³), des quantités importantes de produits sont concernées. Bien que les lignosulfonates ne soient pas directement toxiques pour les organismes vivants, leur dégradation pourrait entraîner une eutrophisation importante du fait de la forte demande biologique en oxygène (DOB₅) induite par la dégradation du produit. À titre d'information, la DOB₅ du lignosulfonate utilisé est de 300 g O₂ / kg et la demande chimique en oxygène nécessaire à l'oxydation totale du lignosulfonate de 1200 kg O₂ / kg.

III.3.6.3 Recommandations d'utilisation

Seul le traitement du limon de Moussy au lignosulfonate a conduit à des applications intéressantes. Les recommandations suivantes concernent de ce fait le traitement du

limon à 2,0 % de lignosulfonate. Afin de bien caractériser les conditions optimales d'utilisation du lignosulfonate, il est nécessaire de :

- déterminer la courbe de compactage et de portance du sol dans leur intégralité et d'identifier la teneur en eau maximale permettant d'assurer une portance acceptable,
- mettre en œuvre le sol traité à des teneurs en eau comprises entre 11 et 14 %,
- compacter le matériau en minimisant le délai après traitement pour éviter la dégradation du produit.

III.3.6.4 Évolution des caractéristiques mécaniques au cours du temps

Du fait de la quantité importante de lignosulfonate requise, une attention particulière doit être portée sur l'évolution des caractéristiques géotechniques du sol traité au cours de la dégradation du produit. Ainsi, les essais de résistance à la compression simple et mesures des VBS ont montré que ces caractéristiques n'évoluaient pas au cours du temps. Cette absence est vraisemblablement liée au mode de conservation des éprouvettes qui limite les échanges gazeux avec l'extérieur et donc les possibilités de dégradation. Par ailleurs, un temps de cure avant compactage a pour effet de réduire l'efficacité du compactage.

Une fois l'ouvrage construit, le lignosulfonate va se dégrader ou être lessivé. La masse volumique sèche obtenue au final devrait ainsi être réduite à hauteur du dosage apporté (Figure III.44). La masse volumique sèche maximale serait alors de $1,81 \text{ Mg/m}^3$ au lieu de $1,85 \text{ Mg/m}^3$ au moment de la mise en œuvre.

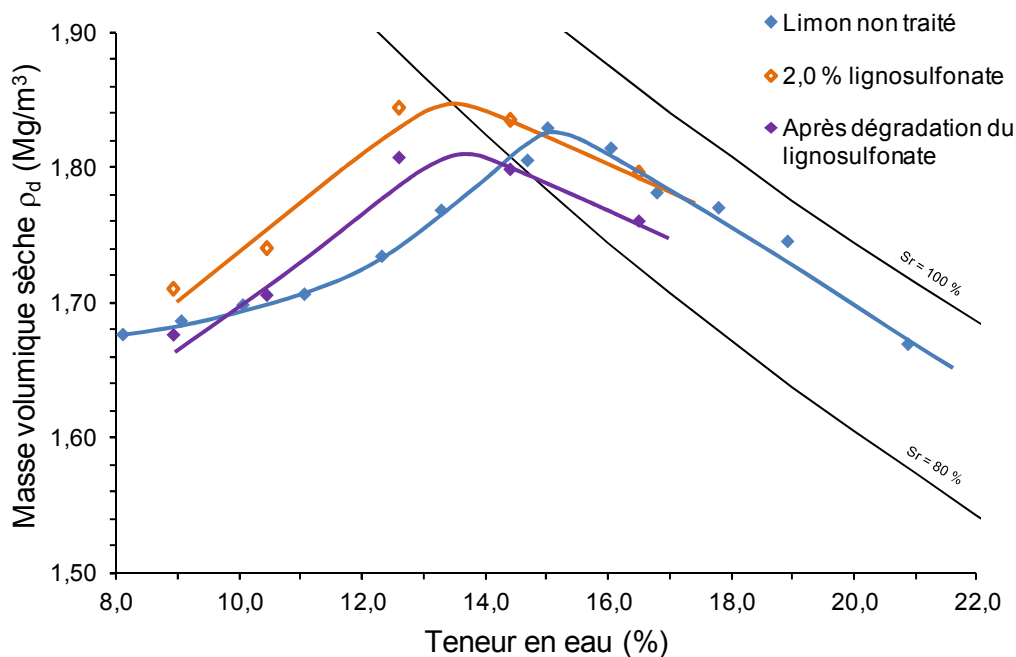


Figure III.44 : Effet de la dégradation ou du lessivage du lignosulfonate sur la masse volumique sèche de la structure compactée.

III.4 Traitement au produit acide : ISS

Le traitement à l'ISS est effectué au dosage de 0,01 % en suivant les protocoles expérimentaux décrits dans le chapitre précédent. Les résultats obtenus sur le limon puis l'argile sont présentés. Ces résultats alimentent la réflexion sur les mécanismes d'action du produit et servent de fondement à la définition des applications potentielles du traitement.

III.4.1 Traitement du limon de Moussy

L'étude des propriétés géotechniques (compactage, résistance à la compression simple et caractéristiques d'identification) sont complétées par l'étude de la microstructure du sol traité.

III.4.1.1 Propriétés de compactage

L'apport d'ISS ne conduit pas à modifier la courbe Proctor du sol de façon significative (Figure III.45). De même, la courbe d'indice portant immédiat est quasiment superposée à celle du limon non traité. Les valeurs d'IPI maximales et à l'optimum sont peu affectées. Afin d'évaluer l'effet d'une augmentation de dosage sur les caractéristiques de compactage du limon, les dosages de 0,1 % et 1,0 % ont été évalués pour quelques teneurs en eau. Les résultats obtenus ont montré que le dosage à 0,1 % ne changeait pas les propriétés de compactage du limon. Toutefois, l'apport de 1,0 % d'ISS induit un fort dégagement gazeux lorsque le produit entre en contact avec le sol du fait de la réaction de l'acide sur les carbonates. Le changement de comportement du sol au compactage associé à ce phénomène est cependant mineur.

L'indice CBR après 4 jours d'immersion est proche de la valeur mesurée pour le sol non traité (7,4 au lieu de 8,8), et le ratio CBRi/IPI inchangé. De même, les gonflements observés au bout de 4 jours sont du même ordre de grandeur (Tableau III.18). Le traitement ne permet donc pas d'améliorer les performances mécaniques du sol lors d'une immersion.

Tableau III.18 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du limon traité à 0,01 % d'ISS.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H$ 4j (%)
Non traité	8,8	0,42	1,0
0,01 % ISS	7,4	0,46	1,0

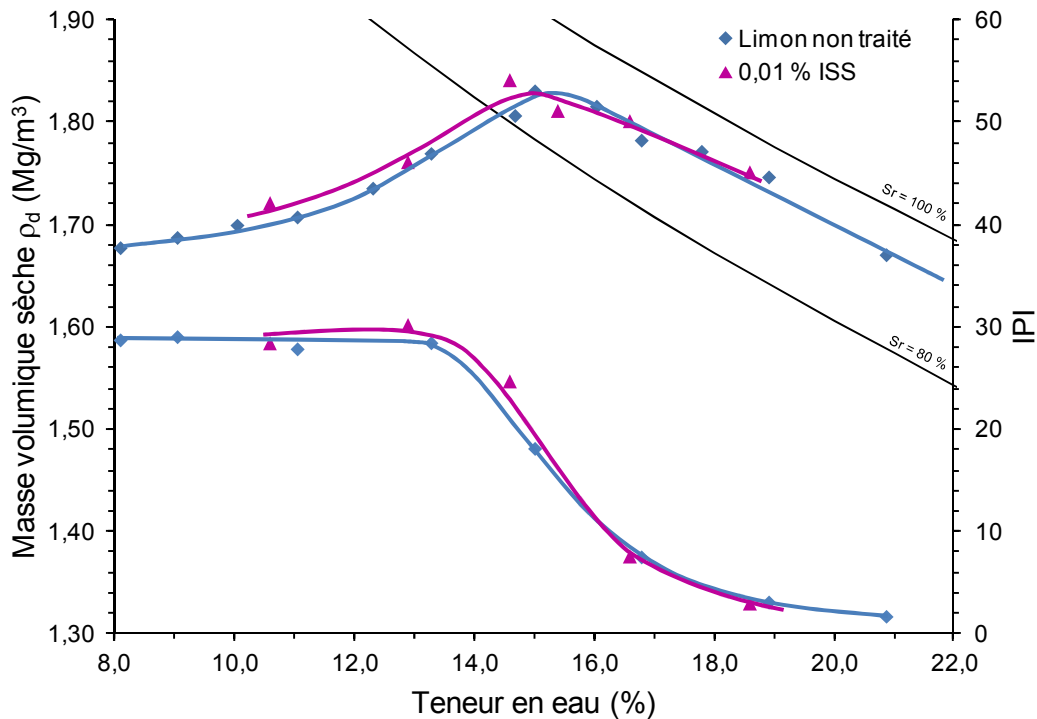


Figure III.45 : Courbes de compactage et de portance du limon traité à 0,01 % d'ISS.

III.4.1.2 Résistance à la compression simple

Les résistances à la compression simple des éprouvettes confectionnées à l'optimum de compactage du sol traité sont voisines de 400 kPa. Les valeurs mesurées n'ont pas été modifiées par le traitement et ne montrent aucune évolution au cours du temps.

III.4.1.3 Caractéristiques d'identification

Les valeurs au bleu de méthylène mesurées après 7 et 28 jours de cure pour le sol traité à l'ISS sont égales à 2,9 g/100g ce qui ne représente pas une variation significative par rapport au sol non traité (3,1 g/100g). Par ailleurs, les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité du limon n'ont pas été modifiés par le traitement à l'ISS (Figure III.46).

Le pH du sol traité à 0,01 % d'ISS n'est pas modifié de façon significative par rapport au sol non traité. Pour qu'une action du traitement soit observée sur le pH, une augmentation du dosage est nécessaire. À titre d'exemple, un dosage de 1,0 % réduit le pH à 7,4.

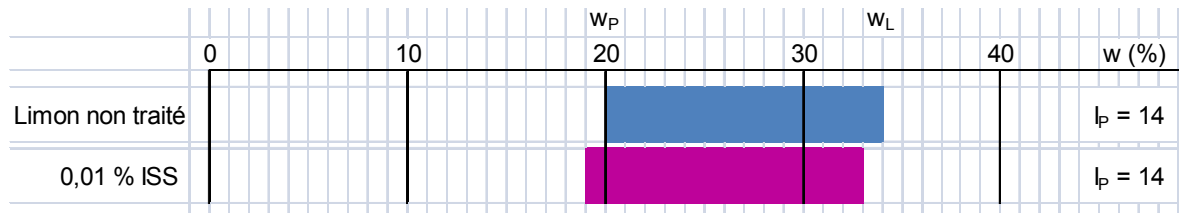


Figure III.46 : Indices de plasticité du limon traité à 0,01 % d'ISS.

III.4.1.4 Microstructure du limon traité

Les images de la surface des échantillons traités à l'ISS montrent une organisation proche de celle du sol non traité (Figure III.47 et Figure III.48). Aucune phase minérale nouvelle n'est détectée. Cependant, l'organisation des minéraux argileux semble avoir été faiblement modifiée avec la formation de structure plus agrégées (Ag, Figure III.48b) rassemblant des minéraux argileux sans orientation préférentielle. D'autres minéraux restent individualisés (flèches, Figure III.48b) à l'instar du sol non traité.

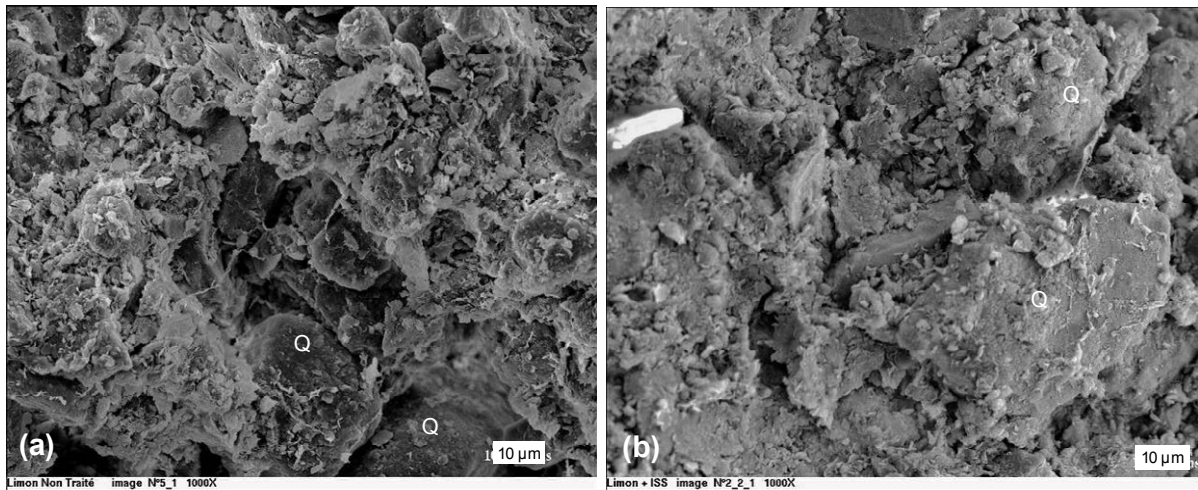


Figure III.47 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,01 % d'ISS (b).

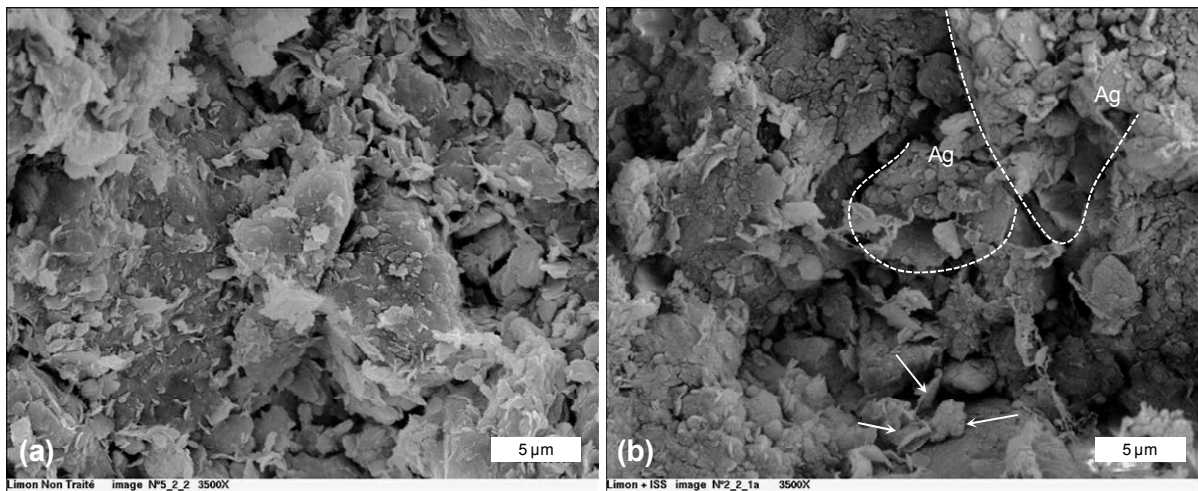


Figure III.48 : Images MEB du limon non traité (a) et traité à 0,01 % d'ISS (b).

Les pores visibles sur les clichés semblent conserver des tailles équivalentes. Cette observation est confirmée par les données obtenues par porosimétrie. Lors de la phase d'injection, une quantité similaire de mercure entre dans l'échantillon (Figure III.49). La courbe de distribution des pores dérivant de la courbe d'injection n'est que faiblement affectée par le traitement. La répartition des pores reste unimodale avec un mode voisin de $0,6 \mu\text{m}$. La courbe de distribution des pores indique une augmentation légère de la fréquence des pores dont les rayons d'entrée sont compris entre $0,3$ et $6 \mu\text{m}$ et une réduction de la fréquence de ceux ayant des rayons compris entre $0,02$ et $0,3 \mu\text{m}$.

Lors de l'essai de porosimétrie, le contrôle des volumes de mercure injectés indique qu'en fin d'essai, le mercure remplit la quasi-totalité des pores du sol.

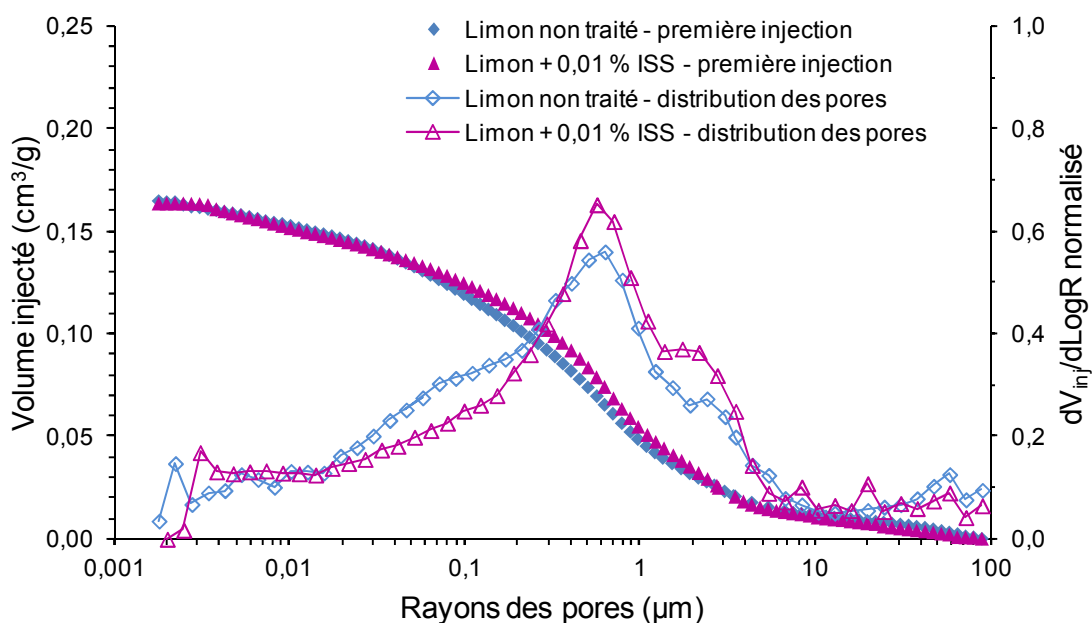


Figure III.49 : Courbes d'injection de mercure et de distribution des pores pour le limon traité à 0,01 % d'ISS.

III.4.2 Traitement de l'argile de Couthenans

Les propriétés géotechniques de l'argile de Couthenans traitée à 0,01 % sont présentées dans les paragraphes suivants.

III.4.2.1 Propriétés de compactage

L'apport d'ISS ne conduit pas à modifier la courbe Proctor du sol argileux de façon significative (Figure III.50). De même, la courbe d'indice portant immédiat demeure identique à celle du sol non traité.

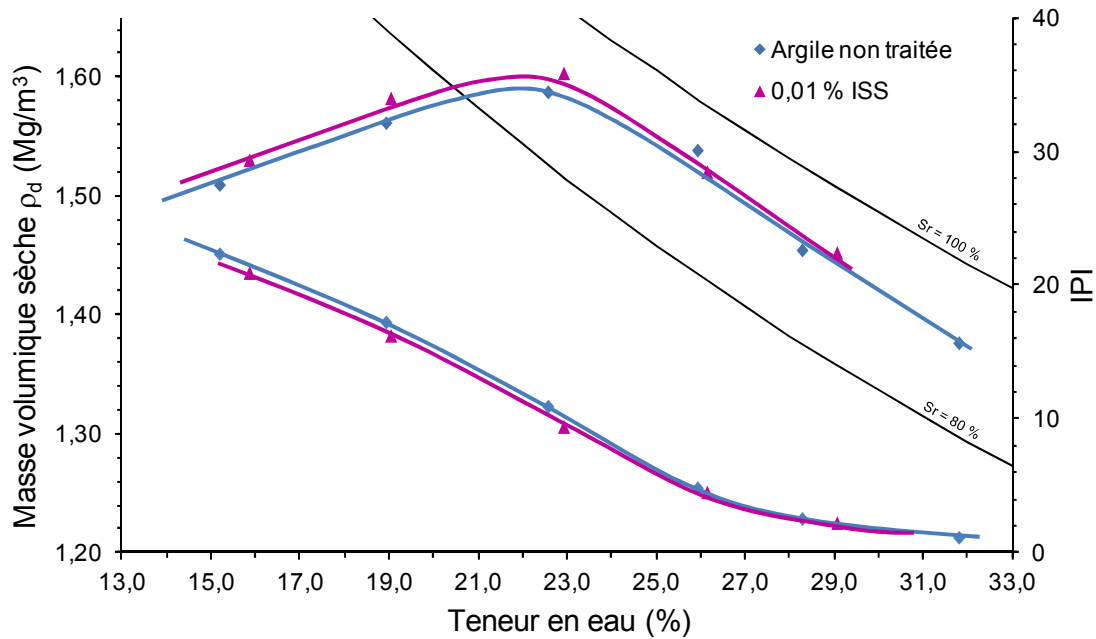


Figure III.50 : Courbes de compactage et de portance du sol argileux traité à 0,01 % d'ISS.

L'indice CBR après 4 jours d'immersion est très faible, voisin de 1, identique à celui du sol non traité. Les gonflements observés au bout de 4 jours sont similaires (Tableau III.19), toutefois la durée de l'essai est trop courte pour permettre leur stabilisation. Compte tenu des résultats obtenus, le traitement ne permet pas d'améliorer les performances mécaniques du sol lors d'un épisode d'immersion.

Tableau III.19 : Grandeurs mesurées après 4 jours d'immersion du sol argileux traité à 0,01 % d'ISS.

Traitement	CBRi	CBRi/IPI	$\Delta H/H_0$ 4j (%)
Non traité	0,9	0,08	3,7
0,01 % ISS	1,1	0,10	3,9

III.4.2.2 Résistance à la compression simple

Les résistances à la compression simple des éprouvettes confectionnées à l'optimum de compactage du sol sont toutes voisines de 400 kPa. Ni le traitement ni le temps de cure n'induisent de modification par rapport à la résistance à la compression simple du sol.

III.4.2.3 Caractéristiques d'identification

Les valeurs au bleu de méthylène mesurées après 7 et 28 jours de cure après traitement à 0,01 % d'ISS sont respectivement de 7,2 et 6,8 g/100g. Ces valeurs restent du même ordre de grandeur que celles mesurées sur le sol non traité dont la moyenne est de 6,4 g/100g. Par ailleurs, les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité du sol n'ont pas été modifiés par le traitement à l'ISS (Figure III.51).

Bien que l'ISS soit une solution acide, le pH du sol n'est pas modifié significativement par le traitement du fait du faible dosage appliqué. Au dosage de 0,01 %, un pH de 6,6, égal à celui du sol non traité. Toutefois, pour un dosage en ISS porté à 1,0 %, un pH de 4,0 a été relevé.

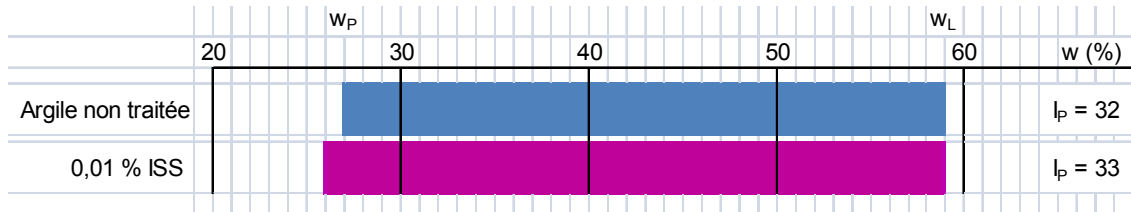


Figure III.51 : Indices de plasticité du sol argileux traité à 0,01 % d'ISS.

III.4.3 Mise en perspective des résultats expérimentaux avec la bibliographie

Pour les produits de la famille de l'ISS, l'absence de modification du comportement des sols au compactage n'est pas constatée de façon systématique dans la littérature. En effet, des réductions de deux à trois points des teneurs en eau optimales ont dans certains cas été rapportées (par ex. Rauch *et al.* 2003) toutefois, aucune tendance n'a pu être établie. Ces observations semblent de plus ne pas être liées à la nature des sols. En ce qui concerne les résistances à la compression simple, Santoni *et al.* (2002) et Tingle & Santoni, (2003) rapportent des résultats similaires à ceux observés au cours de cette étude : le traitement ne modifie pas la résistance à la compression simple des sols. De même, à l'image des résultats rapportés par Scholen, (1995) ou Rauch *et al.* (2002 et 2003), les caractéristiques d'identification ne sont pas modifiées pour les deux sols testés dans cette étude.

Mis à part les effets rapportés sur le compactage, les résultats obtenus pour les essais géotechniques sont cohérents par rapport aux données obtenues dans la littérature. Cependant, au niveau microscopique, il a été supposé que le traitement induisait la formation d'agrégats de minéraux argileux (par ex. Scholen). Ce phénomène a été confirmé par Rauch *et al.* (2003). Toutefois, aucune relation n'a pu être établie entre le comportement des matériaux traités et les modifications se produisant à l'échelle des minéraux argileux.

Au sein de cette étude, les images obtenues au MEB suggèrent également qu'un phénomène d'agrégation puisse avoir lieu sans qu'il n'y ait de modification importante des propriétés géotechniques du sol. Afin de vérifier l'effet du traitement sur l'organisation des minéraux argileux, la recherche du mode d'action du produit a été entreprise.

III.4.4 Discussion sur le mode d'action du traitement

Les résultats disponibles dans la bibliographie suggèrent que la réorganisation des minéraux argileux est induite par les changements de pH et de composition ionique. Une contribution de la dissolution des aluminosilicates suite à la réduction du pH est également évoquée.

Toutefois, au cours de cette étude, le traitement au dosage de 0,01 % du limon et de l'argile n'a pas induit de modification du pH et de ce fait ne peut conduire à la dissolution des aluminosilicates. De plus, dans le cas particulier du limon, la présence de carbonate a pour effet de limiter la réduction du pH lors de l'augmentation du dosage en ISS. Par ailleurs, les caractéristiques d'identification des deux sols n'ont pas été modifiées significativement signe que la nature du sol est inchangée. Seule l'étude de la microstructure semble montrer des modifications dans l'organisation des minéraux argileux du limon avec la formation de structures plus agrégées. L'absence de phénomène temporel sur la résistance à la compression simple et la VBS suggère par ailleurs l'absence de phénomène de prise.

Dans le but d'apporter des données supplémentaires quant à l'effet du traitement sur l'organisation des minéraux argileux, des essais de sédimentation ont été entrepris. Une comparaison du traitement à l'ISS avec une solution d'acide chlorhydrique à 6,0 mol/L est effectuée.

Afin de laisser les minéraux interagir librement, aucun défloculant n'est ajouté à l'eau distillée lors des essais de sédimentation. Le protocole suivi diffère également de l'essai de sédimentométrie pour l'étape de préparation du matériau :

- le passant à 80 μm est prélevé par tamisage par voie humide, puis le sol est partiellement séché. La teneur en eau du matériau est alors de 27 %.
- une masse équivalent à 80 g de sol sec est mélangée à 2 L d'eau distillée contenant 0,66 g/L d'ISS ou d'acide chlorhydrique à 6,0 mol/L. La solution ainsi constituée possède alors la même concentration que celle de l'eau interstitielle du limon compacté à son optimum pour un dosage de 0,01 %.
- le mélange est agité durant 24 heures à l'aide d'un agitateur magnétique réglé sur 600 tr/min.
- une fois l'agitation stoppée, la solution est homogénéisée et la procédure classique d'un essai de sédimentométrie est suivie (cf. NF P 94-048).
- une mesure de pH est effectuée à la fin de l'essai.

La photo (Figure III.52) prise 2 heures après l'arrêt de l'agitation montre une solution d'ISS translucide contrairement à celle d'eau distillée dans laquelle le matériau est toujours en suspension. Ce résultat reflète une vitesse de sédimentation plus élevée dans la solution d'ISS. Or, la vitesse de sédimentation des particules dépend à la fois

de leur diamètre et de leur densité selon la loi de Stokes. Ainsi, une vitesse de décantation rapide traduit la formation d'agrégats de taille plus importante.

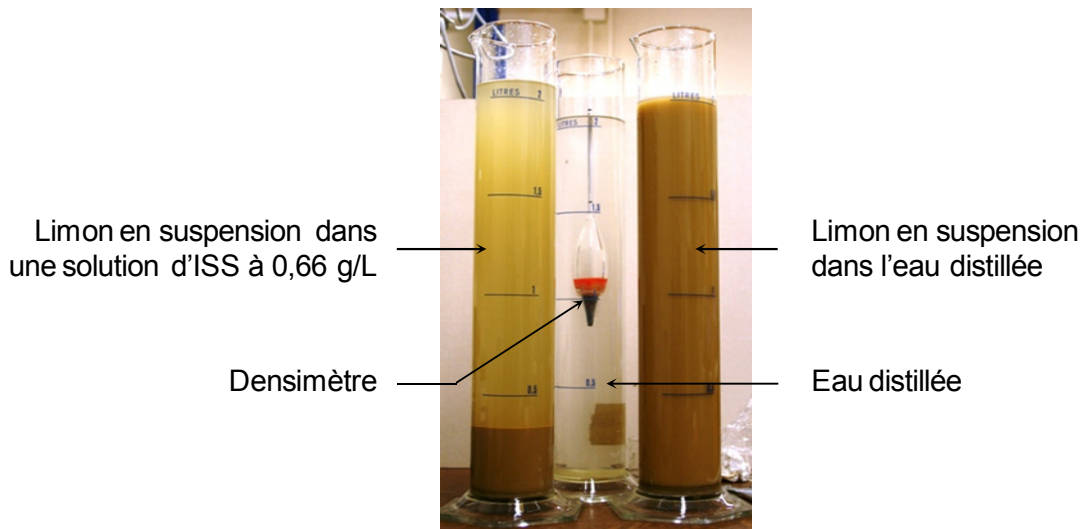


Figure III.52 : Photo des éprouvettes contenant le limon en suspension dans une solution d'ISS et dans l'eau distillée après deux heures de repos.

Les courbes de sédimentation obtenues (Figure III.53) montrent une disparition de la fraction inférieure à 0,01 mm dans le cas de la solution d'ISS et d'acide chlorhydrique. En contre partie, la proportion de particules de tailles comprises entre 0,01 et 0,03 mm augmente par rapport au sol non traité confirmant la formation d'agrégats constitués de l'ensemble des minéraux de dimensions inférieures à 0,01 mm.

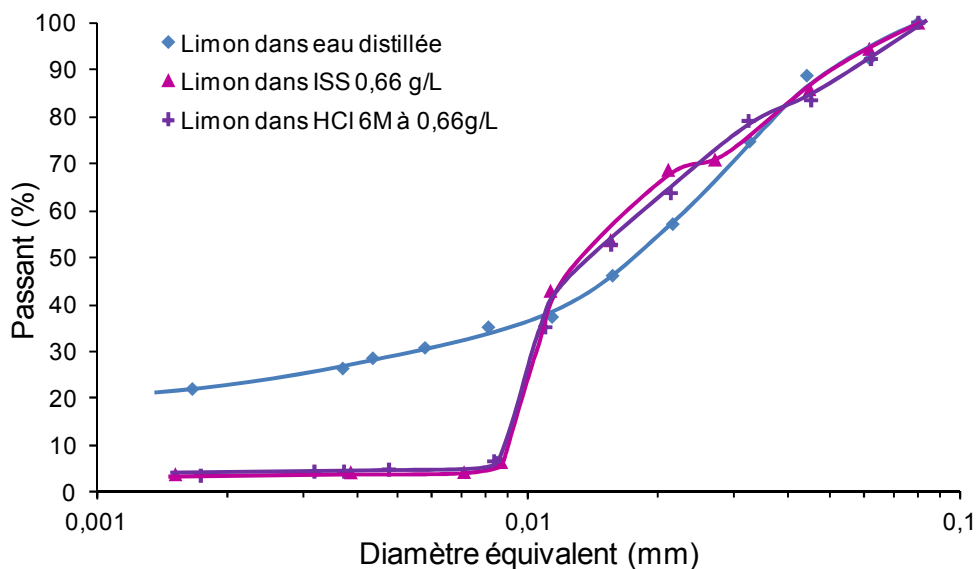


Figure III.53 : Courbes de sédimentation du limon mis en suspension dans une solution d'ISS et d'HCl.

Les essais de sédimentation ont montré la capacité des solutions d'ISS et d'acide chlorhydrique à agréger les particules les plus fines. Par ailleurs, à la fin des essais, les valeurs de pH mesurées pour chacune des solutions étaient proches de 7,5

(Tableau III.20). Ainsi, la formation des agrégats n'est pas imputable à une modification du pH mais à un changement dans la composition ionique du fluide induite par la présence d'ISS ou d'HCl. Le mécanisme d'action mis en jeu dans ce cas est similaire à celui décrit par Palomino & Santamarina (2005), signalant la formation d'agrégats de minéraux de kaolinite après ajout de NaCl sans que le pH n'ait été modifié.

Tableau III.20 : pH des différentes solutions lors des essais de sédimentation du limon.

	Limon mis en solution dans :		
	Eau distillée	ISS 0,66 g/L	HCl 0,66 g/L
pH (+/- 0,07)	7,50	7,47	7,45

De façon générale, les résultats obtenus pour le traitement du limon et de l'argile à l'ISS sont relativement cohérents avec les données publiées et tendent à confirmer l'action des produits non traditionnels acides sur l'état de floculation – agrégation des minéraux argileux. Les produits non traditionnels acides, apportés en faible quantité agissent via leur apport d'ions dont la présence, même à faible dosage, peut induire des modifications dans l'organisation des minéraux argileux. Enfin, les comparaisons effectuées entre l'ISS et l'acide chlorhydrique montrent des actions similaires sur le pH du sol et sur la capacité du produit à former des agrégats.

III.4.5 Applications potentielles du traitement

Compte tenu des résultats sur le comportement géotechnique du limon et de l'argile, aucune application particulière ne se dégage pour le traitement à l'ISS. Il se pose à ce stade la question de l'impact des molécules organiques contenues dans le produit car celles-ci ne semblent pas avoir joué de rôle particulier à l'image des observations effectuées lors des essais de sédimentométrie où l'ISS et l'acide chlorhydrique induisent les mêmes effets. Les spécificités du traitement acide sont dans ce cas difficiles à mettre en évidence. De plus, la composition des produits acides peut subir des variations de composition comme suggéré dans certains brevets (par ex. Merritt, 1991). Cette variabilité constitue une limite supplémentaire à la comparaison entre les différentes études et nécessite de caractériser individuellement les effets de chaque produit acide.

III.5 Conclusion

L'étude expérimentale a permis d'acquérir un ensemble de données factuelles pour les trois traitements retenus. Les résultats montrent des différences dans les comportements observés en fonction de la nature des produits et de celle des sols.

Pour le traitement à la Permazyme, les principaux effets observés concernent les propriétés de compactage du limon. Lorsque le sol est traité, la teneur en eau optimale est réduite et les masses volumiques sèches atteintes du côté sec de l'optimum sont augmentées (Tableau III.21). Cet effet est équivalent à une augmentation de l'énergie de compactage et s'observe aussi bien pour un compactage à l'énergie Proctor normale que modifiée. L'IPI est également affecté par le traitement, à teneur en eau et masse volumique sèche donnée, la portance mesurée est réduite. Les autres caractéristiques mécaniques ne sont que faiblement affectées. Par ailleurs, les modifications de faibles ampleurs observées sont liées à l'état de densité plus élevé atteint après traitement. La Permazyme n'a en outre aucun effet sur les caractéristiques d'identification ni sur la microstructure du sol. La recherche des mécanismes d'action a permis de montrer que les caractéristiques tensioactives du produit jouaient un rôle essentiel lors du compactage du limon.

Le traitement au lignosulfonate a également une action marquée sur les propriétés hydromécaniques des sols. Le traitement permet une meilleure compaction du limon du côté sec de l'optimum avec une action maximale pour un dosage de 2,0 %. Cet effet s'accompagne toutefois d'une tendance à la réduction de l'indice portant immédiat, accentuée par l'augmentation du dosage. La résistance à la compression simple est également maximale pour un dosage de 2,0 %, mais la valeur atteinte ne dépasse toutefois pas celle du limon non traité. L'argile de Couthenans se comporte différemment du limon de Moussy. Le traitement réduit la masse volumique sèche et la portance atteintes après compactage. Plus le dosage est élevé, plus cette réduction est marquée. Pour le limon et l'argile, le lignosulfonate a tendance à réduire la teneur en eau correspondant à la limite de plasticité et de liquidité.

Enfin, le traitement à l'ISS n'a pas induit de modification des caractéristiques hydromécaniques des sols traités.

Tableau III.21 : Synthèse des effets des trois traitements non traditionnels sur les caractéristiques hydromécaniques du limon de Moussy.

Caractéristique	0,002 % Permazyme	Lignosulfonate			0,01 % ISS
		0,5 %	2,0 %	5,0 %	
W_{OPN}	-	-	-	-	=
ρ_d OPN	+	=	+	=	=
IPI _{OPN}	=	=	=	--	=
Rc	=	-	=	--	=
W_P	=	=	-	--	=
W_L	=	-	-	--	=
I_P	=	=	=	=	=

-- : réduction importante ; - réduction moyenne ; = absence de modification

+ augmentation moyenne ; ++ augmentation forte

Les principales applications déduites des résultats expérimentaux concernent le traitement du limon de Moussy à la Permazyme et au lignosulfonate au dosage de 2,0 %. En effet, l'ensemble des autres associations entre sols et traitements n'ont pas eu d'effet exploitable ou conduisaient au contraire à dégrader les propriétés mécaniques des sols.

Pour le limon, plusieurs situations de mise en œuvre permettent de compacter le sol dans des conditions optimisant à la fois les aspects techniques et le bilan environnemental en particulier grâce aux économies d'eau et d'énergie escomptées. Toutefois, les étapes de production des substances utilisées, leur transport et leur mise en œuvre ont également un impact environnemental qu'il est nécessaire d'évaluer sur l'ensemble des phases du cycle de vie de l'ouvrage. Le quatrième chapitre a ainsi pour vocation de définir dans quelle mesure l'utilisation de produits non traditionnels induit une réduction de l'impact environnemental global par rapport à la mise en œuvre du sol non traité.

Chapitre IV :

Évaluation du bilan environnemental des traitements non traditionnels sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage en terre

IV.1 Introduction

Les résultats présentés dans le chapitre III montrent que le traitement à la Permazyme ou au lignosulfonate permet de proposer des variantes de mise en œuvre du limon lorsque celui-ci est dans un état sec. Selon les conditions de mise en œuvre, des économies d'eau et d'énergie peuvent alors être escomptées. Toutefois, il est nécessaire d'aborder la question du bilan environnemental de façon globale en appliquant la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) dont le principe a été décrit au sein du premier chapitre. Par son approche, cette méthode permet d'intégrer l'ensemble des aspects pouvant modifier le bilan environnemental d'une variante.

Comme décrit dans le premier chapitre, l'ACV est une démarche itérative conduite dans le but de répondre à des objectifs précis. Au cours de cette thèse, l'analyse du cycle de vie est utilisée comme un outil d'aide à la prise de décisions devant permettre de comparer les variantes entre elles et de choisir celles dont l'impact environnemental est le plus limité au regard des situations de mise en œuvre.

Ce chapitre présente dans un premier temps la démarche suivie pour calculer les impacts environnementaux du système. Puis, dans une seconde partie, la démarche de l'ACV est menée étape par étape depuis la définition des objectifs jusqu'à la comparaison des impacts des variantes pour les traitements considérés. Enfin, l'étude est complétée par une évaluation de la sensibilité des résultats par rapport aux données d'entrée. Cette dernière étape permet d'apprécier la robustesse des conclusions et d'identifier les intrants générant le plus fort impact.

L'évaluation environnementale des variantes déduites des résultats expérimentaux permettra de mettre en évidence les conditions dans lesquelles les traitements présentent la meilleure combinaison entre intérêts techniques et environnementaux.

IV.2 Méthodologie de l'étude environnementale

L'analyse du cycle de vie est une démarche itérative menée en quatre étapes :

- l'étape de définition des objectifs et du système sur lequel porte l'étude,
- l'étape d'inventaire du cycle de vie,
- l'étape d'évaluation des impacts,
- l'étape d'interprétation.

La première étape consiste à définir l'objectif de l'étude en fonction des attentes des décideurs et du contexte dans lequel l'étude est réalisée. Une fois l'objectif défini, le

système permettant de modéliser le chantier doit être décrit. À ce stade, il s'agit d'identifier l'ensemble des processus sur lesquels l'évaluation environnementale va porter. Elle doit également conduire à la définition de l'unité fonctionnelle servant à normaliser les impacts calculés.

Comme illustré dans le premier chapitre, la seconde étape revient à établir l'inventaire du cycle de vie de chaque variante. Dans un premier temps, les quantités d'intrants (carburants, matières premières, etc) sont estimées (Figure IV.1). Il est ensuite nécessaire d'obtenir un inventaire du cycle de vie (ICV) pour chacun des intrants. Cet inventaire liste l'ensemble des consommations de ressources et des émissions dans l'environnement générées au cours du cycle de vie de l'intrant. En cas d'inexistence d'un l'ICV, il est nécessaire de trouver une alternative pouvant se substituer aux lacunes ou de revoir les frontières du système en conséquence.

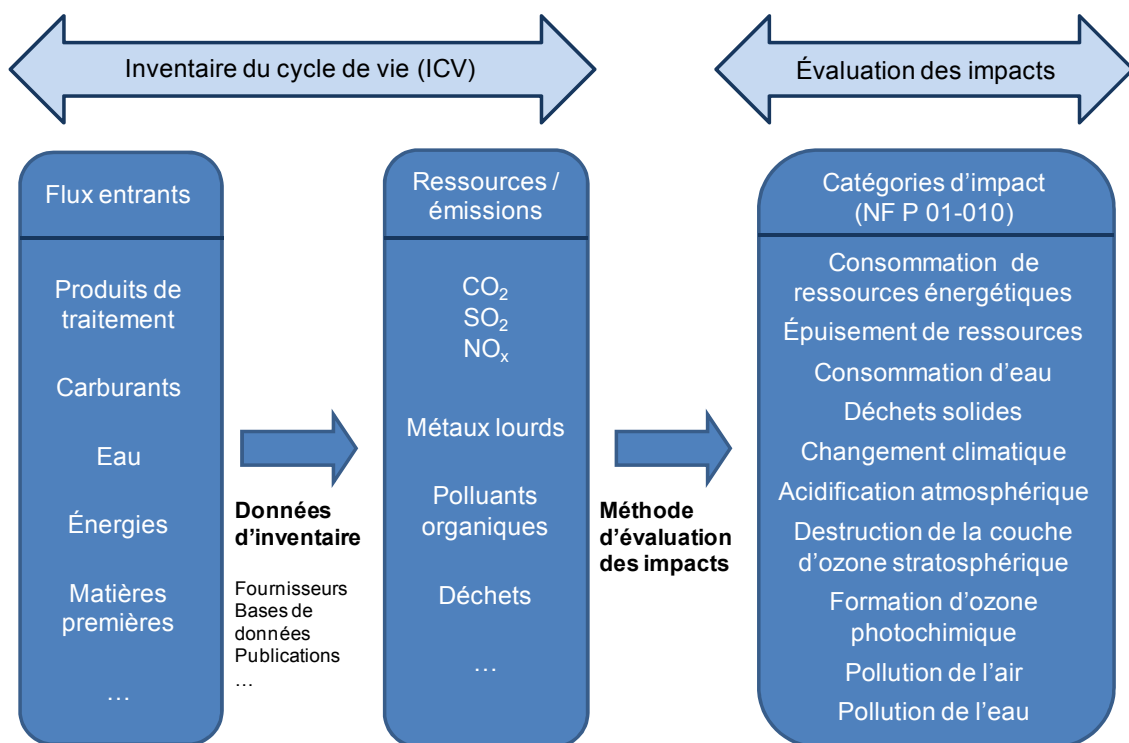


Figure IV.1 : Enchaînement entre la quantification des intrants et le calcul des impacts environnementaux pour les 10 catégories d'impact de la norme NF P 01-010.

L'évaluation des impacts ne peut être conduite qu'à condition d'avoir mené à bien les étapes précédentes. Les bilans environnementaux des variantes peuvent alors être calculés puis comparés. Au cours de cette étude, le calcul des impacts porte sur les 10 catégories définies par la norme française NF P 01-010 (Figure IV.1). Sont par exemple considérés les effets sur le changement climatique, la pollution de l'air ou celle de l'eau. L'ensemble des impacts est calculé à partir des coefficients de conversion donnés par la norme. Ces coefficients permettent de traduire une émission ou un prélèvement de ressource en termes d'impact environnemental. Par exemple, une émission de CO₂, de méthane ou de tout autre gaz à effet de serre est convertie en un impact sur le changement climatique. Une fois l'ensemble des

impacts calculés, la comparaison des bilans environnementaux des variantes est effectuée sur la base de trois situations réalistes où une alternative est proposée entre l'utilisation d'un traitement et la construction de l'ouvrage en sol non traité. La comparaison des impacts calculés pour les 10 catégories permet alors d'établir une première conclusion et d'identifier pour chaque situation la variante qui présente le meilleur bilan environnemental.

Enfin, l'étape d'interprétation permet de discuter des conclusions et de les replacer dans leur contexte. L'étude de sensibilité vise alors à évaluer dans quelle mesure une modification de ces hypothèses est susceptible d'affecter le choix des variantes. Compte tenu de la diversité des hypothèses prises, l'étude de sensibilité porte sur de nombreux aspects comme par exemple sur les frontières du système (phases du cycle de vie prises en compte, intrants considérés), sur la quantification des intrants (par exemple : consommation de carburants en fonction des distances de transport), sur leur ICV ou plus généralement sur l'état initial du sol et l'objectif de compactage. Toutes ces hypothèses pourraient être testées de façon systématique sur l'ensemble des variantes. Toutefois, dans une démarche d'optimisation, il est préférable de mettre en œuvre une approche adaptée à chaque situation.

La stratégie mise en place dans cette étude consiste à identifier quelles hypothèses sont susceptibles de modifier le choix de la variante. Il s'agit donc de tester les hypothèses conduisant à une réduction de l'impact de la variante ayant le plus fort impact environnemental et les hypothèses conduisant à augmenter l'impact environnemental de la variante ayant le meilleur bilan. Ainsi, dans chaque situation, les hypothèses testées seront différentes car adaptées aux résultats obtenus. Au final, l'étude de sensibilité permet de préciser les conditions dans lesquelles les conclusions obtenues sont valables.

IV.3 Conduite de l'analyse du cycle de vie

Cette partie a pour objectif de présenter la démarche entreprise pour évaluer les bilans environnementaux des différentes variantes de mise en œuvre. Après un rappel de l'objectif de l'étude, une définition détaillée des variantes, puis du système sur lequel porte l'étude est proposée. Les hypothèses prises, les justifications et les sources des données d'inventaire sont ensuite présentées. Enfin, les bilans environnementaux des différentes variantes de mise en œuvre sont comparés et une première interprétation proposée.

IV.3.1 Objectif

L'évaluation environnementale est utilisée comme un outil d'aide à la décision destiné aux entreprises. L'objectif de la démarche est de comparer différentes variantes de mise en œuvre du limon dans trois situations données. Chaque variante

faisant intervenir un traitement est comparée à une variante considérant un même ouvrage en sol non traité. Les résultats de l'étude sont ainsi destinés à déterminer l'intérêt environnemental potentiel de l'utilisation d'un traitement non traditionnel dans un contexte défini.

IV.3.2 Définition du système

Le système étudié est un remblai dont les caractéristiques mécaniques sont les suivantes.

- La masse volumique sèche atteinte doit être supérieure à une valeur fixée. Les calculs sont effectués pour une masse volumique sèche de $1,78 \text{ Mg/m}^3$ et pour une teneur en eau initiale de 9,0 %. Ce choix permet de se situer dans un contexte où le traitement présente les meilleurs avantages.
- L'indice portant IPI minimal requis est fixé à 10. Ce choix conditionne les teneurs en eau maximales à ne pas dépasser pour chacune des variantes.

L'unité fonctionnelle choisie représente un volume compacté de 1000 m^3 de limon respectant les caractéristiques mécaniques minimales requises.

Définir le système revient à différencier les processus qui sont pris en compte dans l'étude et ceux qui en sont exclus. Il est ainsi nécessaire d'identifier les différentes étapes comprises dans chacune des phases du cycle de vie de l'ouvrage. Les deux parties suivantes proposent une description du système dans son intégralité puis détaillent les simplifications apportées.

IV.3.2.1 Description des processus entrant dans les différentes phases du cycle de vie

a) Fabrication du matériel et des matériaux

La première phase du cycle de vie correspond à la fabrication des matériaux et du matériel nécessaires à la construction de l'ouvrage. Cette phase inclut :

- l'extraction des matières premières nécessaires à la construction de l'ouvrage,
- la fabrication des produits de traitement,
- la fabrication des engins et appareils de chantiers,
- l'approvisionnement en eau.

b) Transport

La seconde phase du cycle de vie inclut l'ensemble des étapes de transport des matériaux et du matériel depuis leur lieu de production jusqu'au site du chantier. Cette étape comprend également la production et la consommation des carburants (diesel, fuel lourd) nécessaires au transport.

c) Mise en œuvre

Cette phase inclut l'ensemble des étapes de construction depuis l'arrivée sur un terrain vierge jusqu'à la réception du remblai. La phase de construction comprend notamment les étapes suivantes :

- décapage de la terre végétale,
- épandage d'une couche de matériau,
- ajout d'eau et éventuellement de produit de traitement,
- malaxage,
- compactage,
- nivellement.

L'ensemble des consommations énergétiques de ces opérations est également pris en compte au sein de cette phase.

d) Vie en œuvre

La phase de vie en œuvre intègre l'ensemble des opérations de maintenance effectué sur le remblai (réparation suite à un glissement par exemple), ainsi que les effets de la dégradation des produits de traitement.

e) Fin de vie

Arrivé en fin de vie, l'ouvrage peut être déconstruit. Les matériaux extraits sont transportés vers un lieu de dépôt où de valorisation.

IV.3.2.2 Description des hypothèses retenues

Compte tenu de l'objectif de l'étude qui est de réaliser une comparaison entre les variantes de mise en œuvre du sol, les étapes identiques entre les variantes peuvent être exclues des frontières du système et donc de l'analyse.

a) Fabrication du matériel et des matériaux

Au sein de la phase d'acquisition des matériaux et du matériel servant à la construction du remblai, les étapes d'extraction des quantités de sol sont identiques pour l'ensemble des variantes, car la densité recherchée est la même. La durée du chantier est supposée suffisamment courte devant la durée de vie des engins pour que les impacts liés à leur production n'aient pas besoin d'être pris en compte. En résumé, seuls la fabrication des produits de traitement et le prélèvement de l'eau nécessaire à la construction sont évalués au sein de cette phase.

b) Transport

Le transport des produits de traitement de leur lieu de production au site du chantier est pris en compte. Toutefois, il est considéré qu'il n'est pas nécessaire de faire venir du matériel spécifique pour mettre en œuvre les traitements de sol, l'ensemble des

engins de chantier est considéré comme étant disponible sur place. Ainsi, le transport des engins et appareils vers le chantier est exclu du système.

c) Mise en œuvre

Au cours de la phase de construction du remblai, seules les étapes d'humidification, de traitement, de malaxage et de compactage diffèrent entre la solution de référence et les variantes. Les autres étapes sont identiques et sont donc exclues du système.

d) Vie en œuvre

Pour les phases consécutives à la construction, l'entretien du remblai est supposé ne pas avoir été modifié par les traitements. Cependant, prendre en compte la décomposition ou le lessivage des produits nécessite une connaissance précise de l'environnement du chantier, et requière l'acquisition de données spécifiques. Ainsi, ce processus est exclu du système pour éviter d'inclure de trop grandes incertitudes. Cette hypothèse sera toutefois critiquée en fonction des résultats obtenus.

e) Fin de vie

La fin de vie est considérée comme identique dans tous les cas, les produits sont alors supposés être totalement dégradés.

Compte tenu des hypothèses prises, l'étude porte sur les trois premières phases du cycle de vie de l'ouvrage : production des matières premières, transport et mise en œuvre. Le schéma proposé (Figure IV.2) fait la distinction entre les processus entrant dans le système (en bleu) et qui en sont exclus (en blanc).

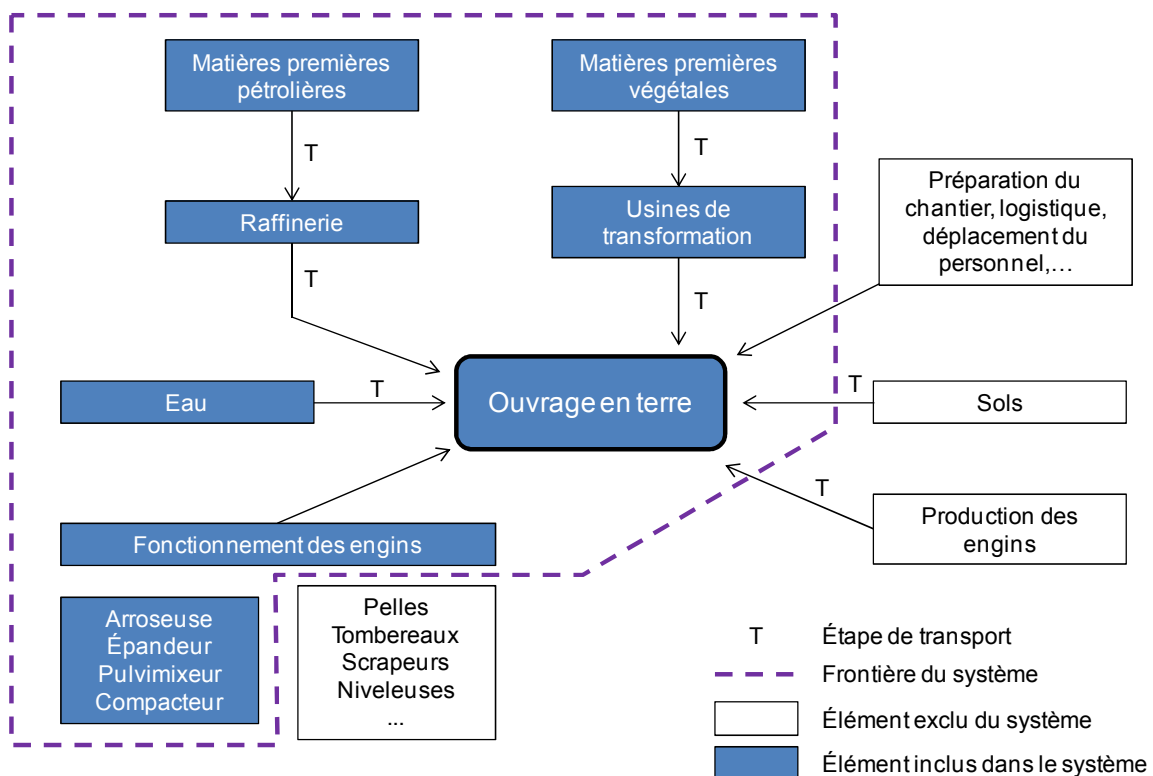


Figure IV.2 : Schéma du système considéré pour l'évaluation environnementale.

IV.3.3 Inventaire du cycle de vie

Dresser l'inventaire du cycle de vie revient à établir pour chaque variante les flux de matières et d'énergie entrant et sortant du système. Dans un premier temps sont calculés les flux entrant. Ces calculs nécessitent notamment la connaissance des quantités de produit de traitement requises, des distances de transport mais aussi des rendements des engins de chantier. Une fois le bilan des flux entrant établi, les données d'inventaire du cycle de vie doivent être obtenues pour chacun d'entre eux. Les références des données sources et hypothèses retenues pour l'estimation des ICV des intrants sont présentées dans une seconde partie.

IV.3.3.1 Calcul des intrants

Le système et ses frontières ayant été définis, il est désormais possible de calculer les intrants pour les différentes variantes de mise en œuvre considérées.

a) Quantités de matériaux

Les matériaux pris en compte dans le système sont les produits de traitement et l'eau. Les quantités de sol, sont jugées équivalentes pour l'ensemble des variantes car la masse volumique sèche finale visée est identique entre les variantes. Leur approvisionnement est de ce fait exclu.

Les quantités de produits sont directement calculées à partir des dosages des produits, et le calcul des quantités d'eau sont calculées à partir de la connaissance des teneurs en eau initiales et finales.

b) Transport

Afin de calculer les distances de transport des différents intrants, il est nécessaire de donner une localisation pour le chantier. Il est ainsi considéré que celui-ci se déroule en région parisienne. Paris sert alors de ville de référence pour le calcul des distances de transport. Le calcul de la consommation des engins est fondé sur un fonctionnement avec un rendement maximal ne considérant aucun temps mort. Les valeurs de consommation horaire et de rendement des engins sont issues du retour d'expérience de DTP Terrassement.

L'eau est prélevée directement dans un cours d'eau et transportée dans la citerne de l'arroseuse jusqu'au lieu du chantier. La distance entre le lieu de prélèvement de l'eau et celui de son épandage est supposée égale à 1 km. La Permazyme est produite aux États-Unis dans l'état de Californie. Son transport nécessite donc des déplacements par voies terrestres et maritimes. Quant au lignosulfonate de calcium, sa production a lieu dans une usine de Karlsruhe (Allemagne). Le transport est effectué par voie routière.

Tableau IV.1 : Distances de transport entre le lieu de production et le lieu de mise en œuvre de l'eau et des produits de traitement.

Produits	Distance parcourue voie terrestre (km)	Distance parcourue voie maritime (km)
Eau	1	0
Permazyme	2950	8000
Lignosulfonate	560	0

La consommation de carburant est évaluée à partir des distances et mode de transport selon les relations suivantes.

Transport routier des produits de traitement

Le calcul est effectué suivant les recommandation du fascicule de documentation FD P 01-015 qui considère l'utilisation d'un camion de charge réelle (Cr) de capacité 24 tonnes consommant 38 L de gasoil pour 100 km et dont le taux de retour à vide est de 30 %. Ainsi, pour le transport d'une quantité Q , la quantité q_{gasoil} de gasoil consommée est donnée par :

$$q_{gasoil} = \frac{38}{100} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{Cr}{24} + \frac{2}{3} + 0,3 \cdot \frac{2}{3} \right) \cdot N$$

$$N = \frac{Q}{Cr}$$

Avec :

d , la distance de transport entre le lieu de production et de mise en œuvre (en km),

Cr , la charge réelle du camion (en tonne), pour les calculs, les camions sont supposés être remplis à 100 % (soit $Cr = 24$),

Q , la quantité de produit + emballages transportée (en tonnes),

N , le nombre de camions nécessaires pour le transport de la quantité Q .

Transport maritime

Les calculs selon FD P 01-015 considèrent des tankers de capacité supérieure à 80 000 tonnes. Leur puissance est de 0,11 kW/tonne pour une vitesse d'avancée de 15 km/h. La valeur énergétique du fuel lourd étant de 0,35 kg/kWh, la consommation de fuel lourd s'établit à 0,0026 kg/tonne.km.

$$q_{fuel} = 0,0026 \cdot d \cdot Q$$

Transport de l'eau

Le transport de l'eau est effectué par l'arroseuse. La consommation de carburant est établie à partir de la consommation horaire c_h (L/h) de l'arroseuse, de sa vitesse de déplacement v (km/h) et de la distance d (km) parcourue entre le lieu de prélèvement de l'eau et son lieu d'épandage. Q (L) est la quantité totale d'eau requise, Cr (L), la quantité réelle transportée par l'arroseuse.

$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{2d}{v} \cdot \frac{Q}{Cr}$$

Les valeurs utilisées pour l'application numérique considèrent une c_h de l'arroseuse de 8 L/h, une charge réelle Cr égale à une capacité maximale de 15 000 L, une vitesse de déplacement de 30 km/h et une distance d de 1 km.

c) Consommation des engins de chantier

Quatre types d'engins de chantier sont considérés. Ainsi, le fonctionnement du compacteur, de l'arroseuse-enfouisseuse, du pulvimixeur et de l'épandeur sont estimés.

Compacteur

Les données de fonctionnement du compacteur sont issues du fascicule II du GTR.

La consommation du compacteur est calculée en utilisant la formule :

$$q_{gasoil} = c_h \cdot D$$

$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{V_{uf}}{k \cdot \frac{Q}{L} \cdot L}$$

Avec :

c_h (L/h), la consommation horaire du compacteur,

D (h), la durée de fonctionnement du compacteur,

V_{uf} (m³), le volume correspondant à l'unité fonctionnelle (1000 m³),

Q/L (m³/h.m), débit théorique d'un compacteur monocylindre d'un mètre de large,

L (m), la largeur du rouleau du compacteur,

k (-), le coefficient de rendement représentant le rapport entre le temps utile de compactage et le temps de présence sur le chantier. Au cours de cette étude, les coefficients de rendement des engins sont tous pris égaux à 1 ce qui revient à supposer que l'ensemble des échelons fonctionnent à leur capacité maximale en régime stationnaire.

Les valeurs suivantes sont prises pour les calculs :

- Type du compacteur : V5
- Consommation horaire : $c_h = 15 \text{ L/h}$
- Largueur du rouleau : $L = 2,1 \text{ m}$

Arroseuse-enfouisseuse

La consommation en carburant de l'arroseuse-enfouisseuse lors de la phase d'épandage de l'eau est calculée selon la formule :

$$q_{gasoil} = c_h \cdot D \cdot n$$
$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{S_{uf}}{S_h} \cdot n$$
$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{V_{uf}}{v \cdot L} \cdot n$$

Avec :

c_h (L/h), la consommation horaire de l'arroseuse-enfouisseuse,

D (h), la durée de fonctionnement de l'arroseuse-enfouisseuse,

S_{uf} (m^2), la surface totale de sol à traiter pour l'unité fonctionnelle,

S_h (m^2), la surface totale parcourue par l'arroseuse en une heure,

V_{uf} (m^3), le volume correspondant à l'unité fonctionnelle (1000 m^3),

e (m), l'épaisseur de la couche compactée,

v (m/h), la vitesse de déplacement de l'arroseuse,

L (m), la largeur de la rampe d'arrosage.

n , le nombre de passes.

Les valeurs suivantes sont prises pour les calculs :

- Vitesse de déplacement lors de l'épandage : $v = 10 \text{ 000 m/h}$
- Nombre de passe : 1 (16 L/m^2 pour $e = 0,3 \text{ m}$)

Pulvimixeur

La consommation en gasoil du pulvimixeur lors de l'étape de mise en œuvre est calculée avec la formule :

$$q_{gasoil} = c_h \cdot D$$

$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{V_{uf}}{V_h}$$

Avec :

c_h (L/h), la consommation horaire du pulvimixeur,

D (h), la durée de fonctionnement du compacteur,

V_{uf} (m³), le volume correspondant à l'unité fonctionnelle (1000 m³),

V_h (m³/h), le rendement horaire moyen du pulvimixeur.

Les valeurs suivantes sont prises pour les calculs :

- Rendement horaire moyen : $V_h = 250 \text{ m}^3/\text{h}$
- Consommation horaire : $c_h = 57 \text{ L/h}$

Épandeur

L'épandeur est nécessaire pour le traitement au lignosulfonate. À l'instar de l'arroseuse-enfouisseuse, la consommation de gasoil de l'épandeur se calcule avec la relation :

$$q_{gasoil} = c_h \cdot D \cdot n$$

$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{S_{uf}}{S_h} \cdot n$$

$$q_{gasoil} = c_h \cdot \frac{\frac{V_{uf}}{e}}{v \cdot L} \cdot n$$

Hypothèses :

- Consommation horaire : $c_h = 18 \text{ L/h}$
- Vitesse de déplacement lors de l'épandage : $v = 10 \text{ 000 m/h}$
- Nombre de passes pour un traitement à 2,0 % : 1 (11 kg/m² pour $e = 0,3 \text{ m}$)
- Largueur d'épandage : $L = 2,1 \text{ m}$

IV.3.3.2 ICV des intrants

L'obtention de l'inventaire du cycle de vie de chaque intrant est nécessaire au calcul de l'impact environnemental des variantes. Les origines des données d'ICV sont présentées dans les paragraphes suivants.

a) Données sur les matériaux

Eau

L'ICV de l'eau dépend principalement de son origine. L'eau peut être prélevée sur des réseaux d'eau potable, dans des cours d'eau, lacs ou encore par pompage dans un forage. Il est également possible d'anticiper les besoins en eau du chantier en créant des bassins pour y stocker les eaux de pluie. Compte tenu de la diversité des approvisionnements possibles et du manque de données statistiques relatives aux prélèvements d'eau sur chantier, l'impact environnemental associé à l'étape de prélèvement de l'eau ne sera pas pris en compte. Ce choix sera discuté dans l'étude de sensibilité à la lumière des résultats obtenus (cf. IV.4.2.3).

Permazyme

L'ICV de la Permazyme n'est pas disponible. De ce fait, des hypothèses de substitution doivent être prises. Comme le montrent les résultats des mesures de tensions superficielles (cf. Chapitre III), la Permazyme a des propriétés tensioactives similaires à celles du Sodium Dodecyl Sulfate (SDS). De plus, l'effet du SDS sur le compactage du limon est similaire à celui observé après traitement à la Permazyme du fait de la présence vraisemblable de tensioactifs dans la formulation du produit.

Ainsi, l'ICV de la Permazyme est assimilé à celui du SDS. Le SDS est un surfactant de la famille des alcools sulfates dont la production dérive de la sulfonation d'alcools extraits d'huile de palme, de noix de coco ou de la pétrochimie (Hirsiger & Schick, 1995). Des données d'ICV pour les alcools sulfates élaborés à partir d'huile de palmes sont disponibles dans Stalmans *et al.* (1995). Ces données sont des moyennes établies sur l'année 1992 pour des entreprises installées en Europe de l'Ouest. La consommation d'eau non mentionnée dans la première étude est estimée à partir des travaux de Pittinger *et al.* (1993).

Lignosulfonate

L'ICV des lignosulfonates est issu d'une étude réalisée par Modahl & Vold (2011), à partir des données obtenues pour une usine située à Sarpsborg en Norvège.

b) Données sur les transports

Les transports consomment deux types de carburants : du diesel pour les poids lourds effectuant les transports routiers, et du fuel lourd pour les cargos chargés du transport maritime.

Connaissant la consommation de carburants lors de la phase de transport des différents intrants, l'ICV de cette étape peut être calculé à partir des données du fascicule FD P01-015 qui propose pour les deux types de carburants, un inventaire du cycle de vie regroupant les étapes d'extraction des matières premières, de mise à disposition des carburants raffinés et de leur combustion lors de la phase de transport.

c) Données sur les engins de chantier

Les données sur le fonctionnement des engins de chantier (consommation horaire, rendement, vitesse de déplacement) sont issues du retour d'expérience de DTP Terrassement. Le calcul de l'ICV de leur fonctionnement considère que le carburant consommé est du diesel et que l'ICV de la consommation du diesel est identique à celui d'un poids lourd routier selon FD P 01-015.

IV.3.4 Définition des variantes de mise en œuvre

Plusieurs situations de mise en œuvre peuvent être distinguées pour les traitements du limon à 0,002 % de Permazyme et à 2,0 % de lignosulfonate (cf. Chapitre III). Les variantes faisant intervenir un traitement sont comparées à trois variantes de mise en œuvre du sol non traité (cf. Chapitre III). Au total, cinq variantes sont donc considérées. Leurs caractéristiques sont résumées sous forme d'un tableau (Tableau IV.2). Pour les cinq variantes, les calculs sont menés pour une teneur en eau initiale w_i de 9,0 %. L'objectif est de dépasser la masse volumique sèche (ρ_d) de $1,78 \text{ Mg/m}^3$. Ces valeurs sont choisies au sein de la gamme de valeurs pour lesquelles les traitements ont des applications techniques et implications environnementales intéressantes. Le choix de ces paramètres est discuté au cours de l'étude de sensibilité.

Tableau IV.2 : Teneurs en eau initiales, finales et énergie de compactage de chacune des variantes constructives.

N°	Traitement	w_i (%)	w_f (%)	Énergie de compactage
1	0,002 % Permazyme	9,0	11,5	EPN
2	2,0 % lignosulfonate	9,0	11,5	EPN
3		9,0	14,0	EPN
4	Non traité	9,0	11,5	170 % EPN
5		9,0	9,0	EPM

Deux variantes faisant intervenir un traitement sont considérées.

La variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme consiste en une humidification du sol jusqu'à une teneur en eau de 11,5 %. La Permazyme concentrée est mélangée avec l'eau servant à humidifier le sol. L'humidification est opérée en une passe par aspersion de la solution de traitement par une arroseuse-enfouisseuse puis un passage en une passe du pulvimixeur. Le compactage est effectué à l'énergie Proctor normale.

Pour le traitement au lignosulfonate, une première étape consiste à humidifier le sol par aspersion de l'eau en une passe, suivi d'un passage du pulvimixeur. À l'issue de

cette étape, la teneur en eau du sol est de 11,5 %. La quantité requise de lignosulfonate est épanchée en une passe puis un passage de pulvimixeur permet de mélanger le produit au sol avant compactage à l'énergie Proctor normale.

Trois variantes de mise en œuvre du sol non traité sont étudiées.

La première variante consiste à humidifier le sol de façon à ce qu'un compactage à l'énergie Proctor normale (EPN) soit suffisant pour atteindre la masse volumique sèche minimale visée. Dans le cas de figure considéré, la teneur en eau doit être amenée à 14 %. En considérant que l'humidification du sol est effectuée suivant les recommandations du guide technique du traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques GTS (LCPC-SETRA, 2004) par paliers de trois pourcents de teneur en eau, deux étapes d'humidification sont requises. Chaque étape consiste à asperger l'eau en une passe puis à homogénéiser le sol par un passage du pulvimixeur. Une fois la teneur en eau requise atteinte, le compactage a lieu à l'énergie Proctor normale.

La seconde variante consiste à effectuer une humidification du sol pour que la teneur en eau de mise en œuvre soit identique à celle des variantes non traitées ($w = 11,5\%$). Dans ce cas, une seule étape d'humidification est requise. L'étape de compactage nécessite une énergie supérieure à l'énergie Proctor normale. Selon le GTR, l'énergie supplémentaire devant être apportée pour un sol de type A2 dans un état sec est de 70 % si l'objectif de compactage est de 95 % de la masse volumique sèche maximale. Le calcul du bilan environnemental de cette variante est donc effectué pour un compactage à 170 % de l'énergie Proctor normale.

La troisième variante de mise en œuvre correspond à un compactage intense du sol non traité sans modification de sa teneur en eau initiale. Cette variante requiert un nombre de passes élevé du compacteur. Un compactage à l'énergie Proctor modifiée est alors considéré.

IV.3.5 Évaluation des impacts

La quantification des intrants et la connaissance des ICV associés permettent de calculer les impacts de chacune des variantes.

Trois situations sont étudiées, chacune correspondant à la comparaison d'une des trois variantes non traitées avec une variante considérant un traitement. Dans un premier temps, sont présentés les résultats obtenus pour le traitement à la Permazyme, puis pour le traitement au lignosulfonate. Pour chaque situation, la quantification des flux entrants et la comparaison des bilans environnementaux doit permettre de mettre en évidence la variante présentant le meilleur bilan environnemental.

IV.3.5.1 Traitement à la Permazyme

a) Situation n°1

Cette situation considère que le traitement à la Permazyme permet de compacter le limon à une teneur en eau de 11,5 % au lieu des 14 % requis pour la mise en œuvre du sol non traité si le compactage est effectué à l'énergie Proctor normale.

Le bilan des flux entrant dans le système rapporté à l'unité fonctionnelle a été établi (Tableau IV.3). Ce bilan permet de comparer l'impact environnemental des deux variantes (Figure IV.3). Le calcul des intrants montre que la quantité d'eau et de diesel consommée pour la variante non traitée sont supérieures à celles requises pour la variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme. Ainsi, 89 000 L d'eau doivent être apportés pour la mise en œuvre du sol non traité contre 44 500 L pour le traitement à la Permazyme. De même, la consommation du pulvimixeur est deux fois moindre dans le cas du traitement car une seule passe suffit contrairement à la variante non traitée où la mise à teneur en eau requiert deux passes de pulvimixeur.

Tableau IV.3 : Intrants estimés pour la situation considérant le traitement à 0,002 % de Permazyme en remplacement d'un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.

Intrants	Non traité EPN	0,002 % Permazyme EPN
Eau (L)	89 000	44 500
Produit (kg)		35,6
Camion		2,0
Diesel (L)		
Arroseuse	5,2	2,9
Pulvimixeur	456	228
Compacteur	30	30
Fuel lourd (kg)		0,7

Le calcul des indicateurs des 10 catégories d'impact proposés dans la norme NF P 01-010 montre que la variante traitée présente des impacts réduits dans 7 catégories sur 10 (consommation de ressources énergétiques, épuisement de ressources naturelles, consommation d'eau, changement climatique, formation d'ozone atmosphérique, pollution de l'air, pollution de l'eau). La consommation d'énergie est par exemple réduite de plus de 40 % en passant de $18,8 \cdot 10^3$ MJ à $10,7 \cdot 10^3$ MJ pour le traitement à la Permazyme. Au contraire, pour trois catégories, l'impact est augmenté, la production de déchets et la destruction de l'ozone stratosphérique en tête, suivie de l'acidification atmosphérique. Au-delà des valeurs calculées, il est nécessaire de se poser la question du caractère significatif des écarts observés. En effet, pour la production de déchets par exemple, la variante traitée présente un impact 4,5 fois supérieur à la variante non traitée. Cependant, l'augmentation de la production de déchets ne représente en valeur que 2,8 kg pour 1000 m^3 de sol

compacté ce qui correspond à un volume très faible en comparaison aux 5200 kg/personne et par an produite en moyenne en Europe (Eurostat, 2008).

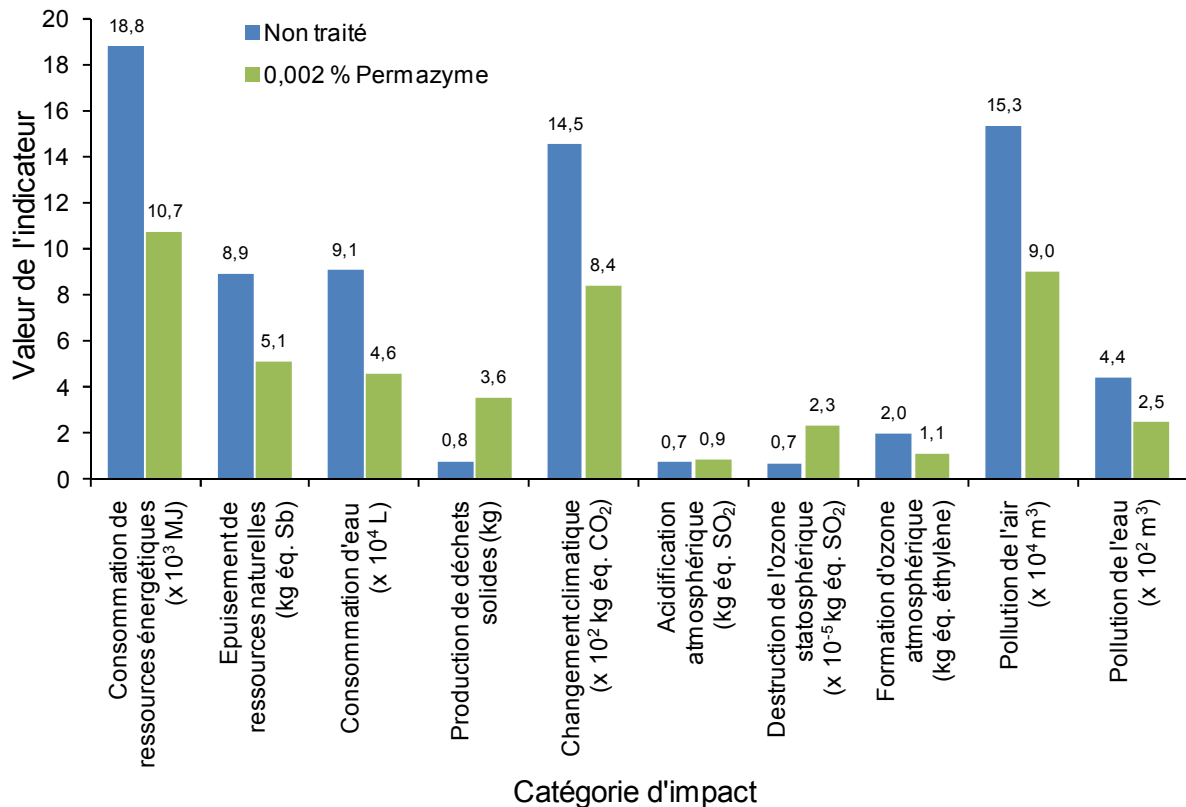


Figure IV.3 : Comparaison des impacts environnementaux entre le traitement à 0,002 % de Permazyme et un compactage à l'énergie Proctor normale du sol non traité.

b) Situation n°2

La seconde situation compare une mise en œuvre du sol à une teneur en eau finale identique. Dans ce cas, le sol non traité doit être compacté à une énergie supérieure à l'énergie Proctor normale estimée à 170 % de l'énergie Proctor normale.

Le calcul des intrants pour les deux variantes considérées montre que la consommation d'eau est identique car le sol est alors compacté à une teneur en eau finale égale (Tableau IV.4). La consommation de diesel par les engins de chantier est également identique à l'exception du compacteur dont le fonctionnement est augmenté lors de la mise en œuvre du sol non traité (51 L au lieu de 30 L). La consommation de carburant requise pour le transport du produit de traitement (2 L de diesel et 0,7 kg de fuel lourd) réduit l'écart observé entre les consommations totales de carburants mais reste en faveur du traitement.

Le calcul des impacts environnementaux pour les dix catégories considérées révèle des valeurs proches. À l'exception des catégories d'impact évaluant la production de déchets, l'acidification atmosphérique et la destruction de l'ozone photochimique, défavorables au traitement, les autres impacts sont identiques.

Tableau IV.4 : Intrants estimés pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et pour un compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.

Intrants	Non traité 170 % EPN	0,002 % Permazyme EPN
Eau (L)	44 500	44 500
Produit (kg)		35,6
Camion		2,0
Arroseuse	2,9	2,9
Pulvimixeur	228	228
Compacteur	51	30
Fuel lourd (kg)		0,7

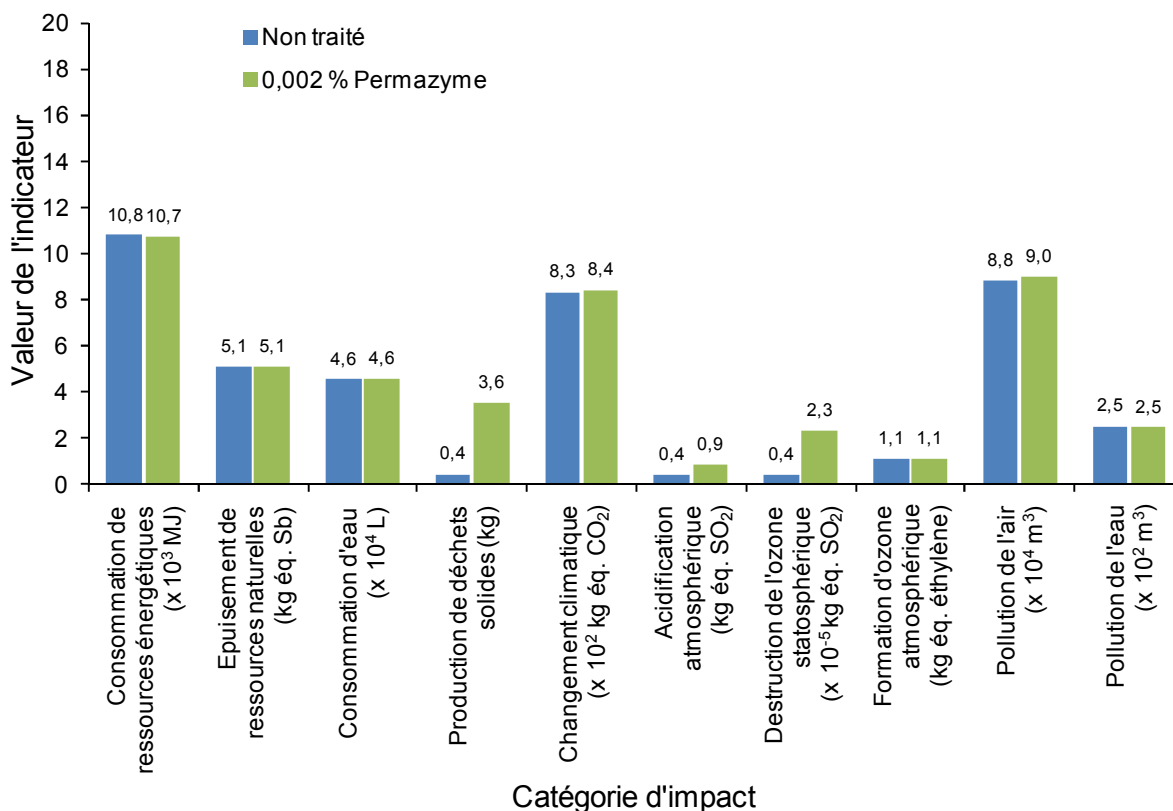


Figure IV.4 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et le compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.

c) Situation n°3

Dans cette situation, la variante non traitée ne considère que le fonctionnement du compacteur dont la consommation de diesel s'élève à 119 L (Tableau IV.5). Pour la variante considérant le traitement, la seule consommation du pulvimixeur est estimée à 228 L. Cette consommation est bien supérieure à celle du compacteur, seul engin pris en compte pour la variante non traitée dans cette situation. De plus, la variante

faisant intervenir le traitement nécessite un apport d'eau (44 500 L) et de produit de traitement (35,6 kg). L'étude des flux entrants indique de ce fait que l'impact environnemental est nécessairement moindre pour la variante non traitée. Ainsi, l'étude des intrants est ici suffisante pour répondre à l'objectif et désigne la variante non traitée comme celle ayant l'impact environnemental le plus faible.

Tableau IV.5 : Intrants estimés pour la situation considérant le traitement à 0,002 % de Permazyme et un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.

Intrants	Non traité EPM	0,002 % Permazyme EPN
Eau (L)		44 500
Produit (kg)		35,6
Diesel (L)	Camion	2,0
	Arroseuse	2,9
	Pulvimixeur	228
	Compacteur	119
	Fuel lourd (kg)	

Dans ce cas, le calcul des impacts n'est pas nécessaire. Toutefois, leur comparaison permet de visualiser les écarts existants entre variantes (Figure IV.5).

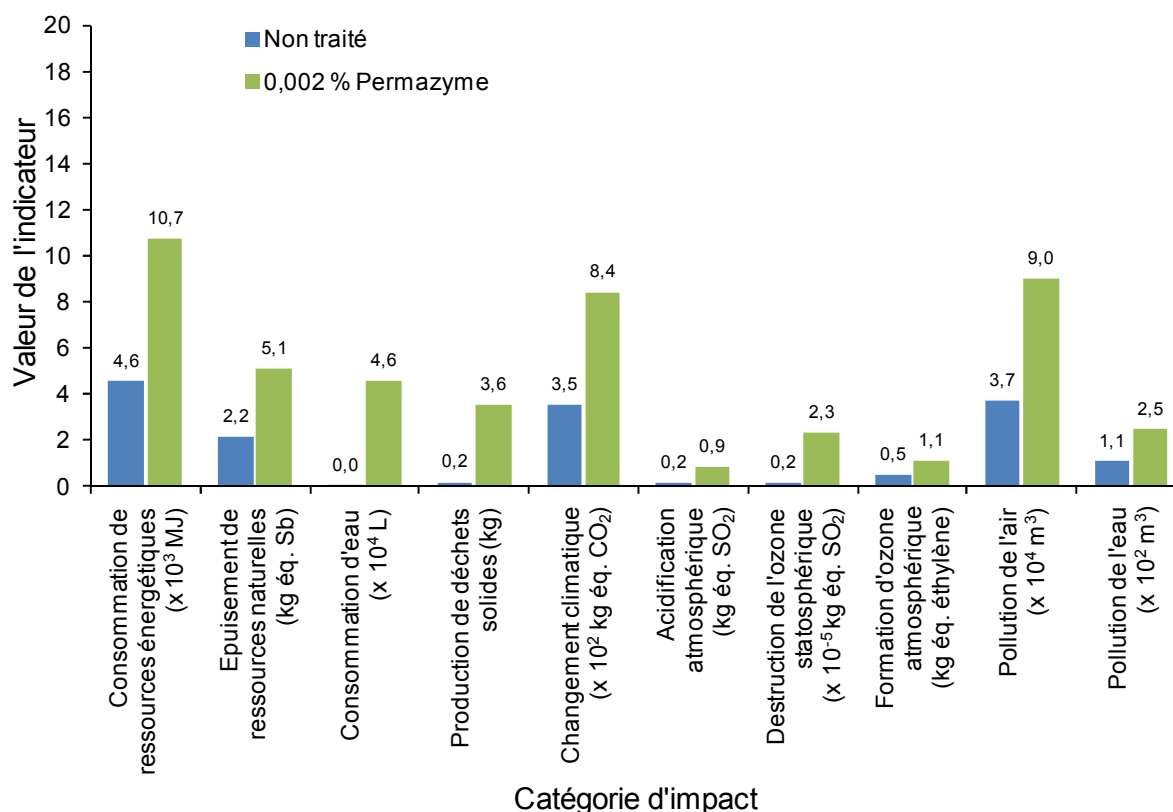


Figure IV.5 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 0,002 % de Permazyme et le compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.

d) Synthèse

Parmi l'ensemble des situations étudiées, le traitement à la Permazyme conduit à améliorer le bilan environnemental lorsqu'il est utilisé en remplacement d'une humidification suffisante du sol pour permettre son compactage à l'énergie Proctor normale. Dans les autres situations, le traitement présente un impact environnemental équivalent ou supérieur aux variantes non traitées. L'intérêt environnemental du traitement dépend donc des conditions dans lesquelles la variante est utilisée.

Ce constat doit cependant être complété par l'étude de sensibilité qui permettra de quantifier dans quelle mesure les observations effectuées peuvent être généralisées en fonction des paramètres d'entrée (cf. IV.4).

IV.3.5.2 Traitement au lignosulfonate

a) Situation n°1

À l'image de la démarche menée pour le traitement à la Permazyme, le traitement du limon à 2,0 % de lignosulfonate permet d'atteindre les objectifs techniques fixés. Le bilan des flux entrants montre que la quantité d'eau requise est alors réduite par rapport à la variante non traitée (Tableau IV.6). Toutefois cette différence nécessite l'apport d'une masse de 35 600 kg de lignosulfonate dont le transport représente une consommation de carburant estimée à 379 L.

Le calcul des indicateurs des 10 catégories d'impact révèle que le traitement au lignosulfonate conduit à dégrader fortement le bilan environnemental du système. À titre d'exemple, la consommation énergétique pour la variante considérant le traitement au lignosulfonate est évaluée à 927.10^3 MJ au lieu de $18,8.10^3$ MJ pour la variante non traitée (Figure IV.6). Les résultats montrent également que malgré une réduction de la quantité d'eau consommée lors de la mise en œuvre grâce à l'utilisation du traitement, cette réduction ne se retrouve pas dans le calcul de l'indicateur « consommation d'eau ». En effet, sur l'ensemble du cycle de vie, la consommation d'eau est estimée à 460.10^4 L pour le traitement au lignosulfonate au lieu de $9,1.10^4$ L pour la variante non traitée. Cette différence est essentiellement due à la consommation d'eau requise lors de la production du lignosulfonate comme montré dans l'étude de sensibilité (cf. IV.4).

Tableau IV.6 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.

Intrants	Non traité EPN	2,0 % lignosulfonate
Eau (L)	89 000	44 500
Produit (kg)		35 600
Camion		379
Arroseuse	5,2	2,9
Pulvimixeur	456	456
Épandeur		2,9
Compacteur	30	30
Fuel lourd (kg)		

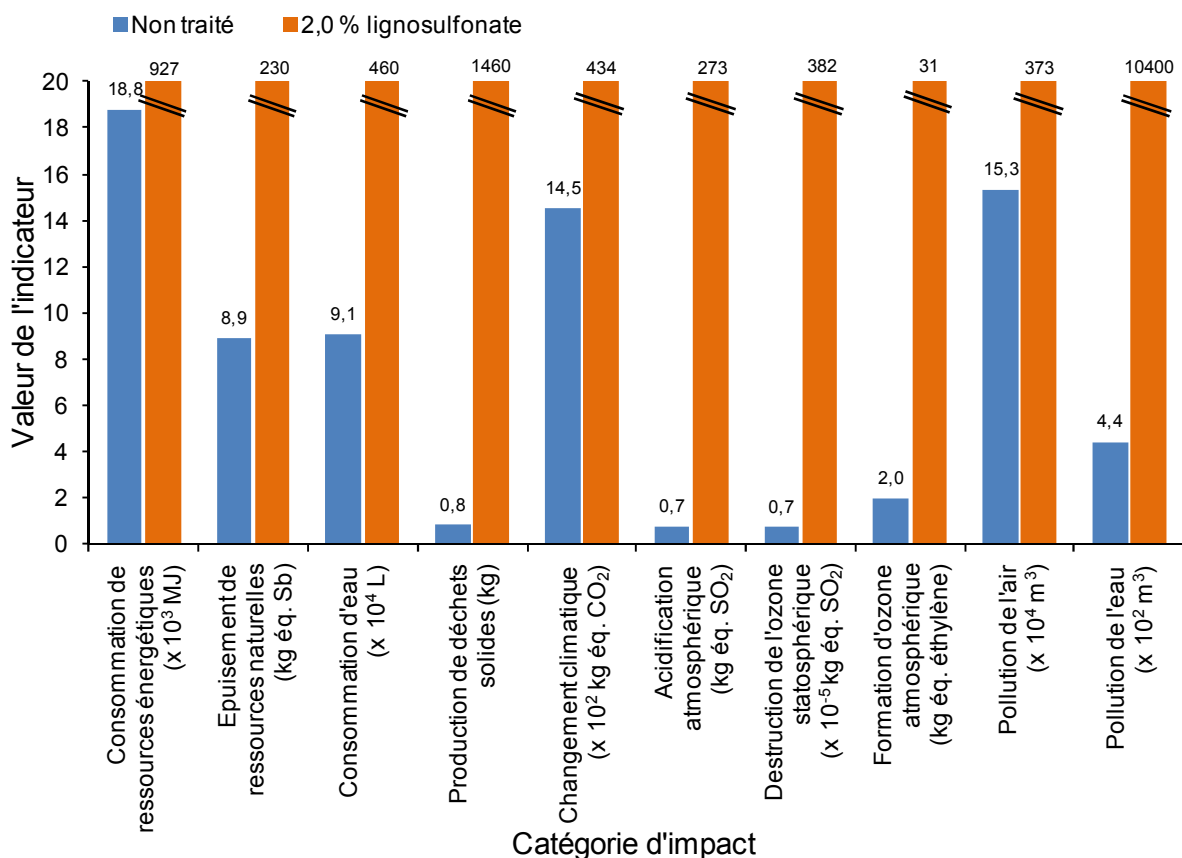


Figure IV.6 : Comparaison des impacts environnementaux pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor normale.

b) Situation n°2

Dans cette situation, le bilan des flux entrant dans le système montre alors que le traitement induit une consommation de carburant plus élevée que la variante non

traitée. Le gain de carburant effectué sur l'étape de compactage (21 L de diesel) est amplement compensé par la consommation liée au transport du lignosulfonate (379 L). De plus, l'impact de la production du produit de traitement alourdit le bilan environnemental de la variante.

Dans cette situation, le bilan des flux entrant est suffisant pour répondre à l'objectif de l'évaluation environnementale : la variante considérant la mise en œuvre du sol non traité présente un meilleur bilan environnemental. Il n'est de ce fait pas nécessaire de calculer les impacts environnementaux des dix catégories.

Tableau IV.7 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à 170 % de l'énergie Proctor normale.

Intrants		Non traité 170 % EPN	2,0 % lignosulfonate EPN
	Eau (L)	44 500	44 500
	Produit (kg)		35 600
Diesel (L)	Camion		379
	Arroseuse	2,9	2,9
	Pulvimixeur	228	456
	Épandeur		2,9
	Compacteur	51	30
	Fuel lourd (kg)		

c) Situation n°3

La variante faisant intervenir le traitement au lignosulfonate présente des flux entrants supérieurs à la variante non traitée (Tableau IV.8). En effet, la consommation de diesel par les différents engins de chantier et par les camions effectuant le transport du lignosulfonate s'élève à 871 L au lieu de 119 L. De plus, il faut également considérer les impacts associés à la production des 35 600 kg de lignosulfonate et la consommation d'eau (44 500 L). Ainsi, le calcul des flux entrants montre que la variante non traitée présente un impact environnemental moindre. Il n'est de ce fait pas nécessaire de conduire le calcul des impacts à son terme.

Tableau IV.8 : Intrants estimés pour le traitement à 2,0 % de lignosulfonate et pour un compactage du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée.

Intrants		Non traité EPM	2,0 % lignosulfonate EPN
Eau (L)			44 500
Produit (kg)			35 600
Diesel (L)	Camion		379
	Arroseuse		2,9
	Pulvimixeur		456
	Épandeur		2,9
	Compacteur	119	30
Fuel lourd (kg)			

d) Synthèse

L'étude des flux entrant dans le système et le calcul de l'impact environnemental de la variante traitée au lignosulfonate montrent que quelle que soit la situation considérée, l'impact environnemental du traitement dépasse l'impact des variantes non traitées. Le traitement au lignosulfonate ne présenterait donc pas d'avantage environnemental. L'étude de sensibilité permettra toutefois d'estimer s'il existe des situations et hypothèses sous lesquelles le traitement permettrait d'améliorer le bilan environnemental des chantiers de terrassement.

IV.4 Étude de sensibilité de l'impact environnemental

L'étude de sensibilité a pour objectif d'évaluer l'impact d'une modification des hypothèses et des données d'entrée utilisées lors du calcul des bilans environnementaux. Cette étude porte sur les principales hypothèses retenues lors du calcul des impacts des différentes variantes. Ces hypothèses portent sur les caractéristiques initiales du sol, sur la définition des frontières du système ou encore sur les ICV considérés pour les différents intrants pour le traitement à la Permazyme et au lignosulfonate.

Dans un premier temps, l'influence des paramètres initiaux du sol est discutée puis dans une seconde partie celle de la prise en compte des phases de vie en œuvre et de fin de vie. Enfin, pour chacun des traitements, les sources de variabilité possibles sont identifiées et leurs effets étudiés pour les différentes situations.

IV.4.1 Sensibilité par rapport aux caractéristiques initiales du limon

Les calculs présentés précédemment ont été conduits pour une teneur en eau initiale donnée et pour un objectif de compactage fixé. Les variantes de mise en œuvre sont toutefois valables dans une gamme de teneur en eau et de masse volumique sèche plus large. Une étude de sensibilité est proposée pour ces deux paramètres.

IV.4.1.1 Teneur en eau initiale

La teneur en eau initiale prise en compte dans les calculs est de 9 %. Pour des teneurs en eau initiales plus faibles, une humidification supplémentaire doit avoir lieu pour que les traitements présentent un intérêt technique. Cette étape supplémentaire revient à apporter une quantité d'eau suffisante pour arriver au moins à la teneur en eau de 9 %. La quantité d'eau supplémentaire apportée est alors égale pour l'ensemble des variantes ce qui conduit à une augmentation de l'impact environnemental identique quelle que soit la variante.

Seule la variante considérant la mise en œuvre du sol non traité à l'énergie Proctor modifiée ne nécessite pas d'apport d'eau supplémentaire. En effet, le compactage à cette énergie permet de dépasser la masse volumique sèche minimale requise pour des teneurs en eau inférieures à 9 %. Toutefois, à très faible teneur en eau, une étude spécifique *in situ* doit être menée pour juger de la compactibilité du matériau sans humidification. Cette variante présentera toutefois un impact environnemental inférieur à celui de la variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme ou au lignosulfonate.

En conclusion, pour l'ensemble des variantes (n°1 à 4, cf. Tableau IV.2 p. 159) à l'exception de celle considérant le compactage à l'énergie Proctor modifiée du sol non traité, l'impact environnemental sera plus élevé que celui initialement calculé. Toutefois, les écarts observés entre variantes resteront identiques, ce qui ne conduira pas à modifier le choix de la variante la moins préjudiciable à l'environnement pour chacune des situations.

IV.4.1.2 Masse volumique sèche visée

La masse volumique sèche ayant servi aux calculs est fixée à 1,78 Mg/m³. Cependant, pour un compactage à l'énergie Proctor normale, les variantes définies sont valables pour des masses volumiques sèches allant de 1,72 à 1,82 Mg/m³. Afin d'estimer l'ampleur des modifications induites, les impacts ont été calculés pour les deux masses volumiques sèches extrêmes. Les résultats peuvent être illustrés par l'exemple du traitement à la Permazyme dans la situation n°1 (Figure IV.7).

Pour cet exemple, les résultats indiquent que pour les deux variantes considérées, l'impact calculé dans chacune des catégories n'est pas modifié de façon significative. En effet, les variations observées sont généralement inférieures à 1 % à l'exception de la consommation d'eau augmentée d'environ 5 % pour les variantes considérant

un compactage à 1,82 Mg/m³. Ainsi, la comparaison entre les variantes montre que l'impact environnemental n'est pas sensible au choix de ce paramètre, en effet, les impacts calculés pour les deux hypothèses apparaissent comme quasi identiques malgré la modification de l'objectif de compactage.

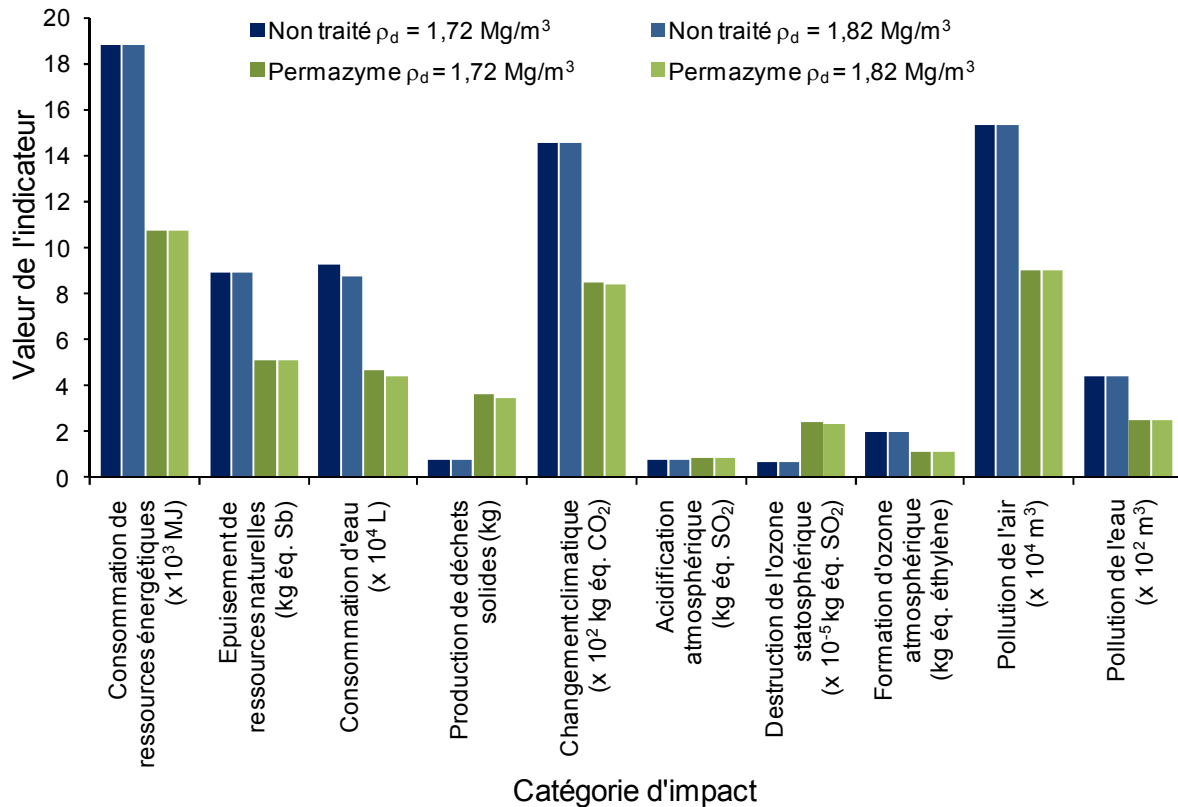


Figure IV.7 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et la variante traitée à la Permazyme en fonction de la masse volumique sèche minimale requise.

IV.4.2 Influence de la définition de la frontière du système

L'étude de sensibilité effectuée sur les variantes de mise en œuvre a été réalisée en respectant l'ensemble des hypothèses relatives à la définition des frontières du système. Cependant, ces hypothèses ont également une influence sur les bilans environnementaux. Les hypothèses retenues lors de la définition du système sont :

- l'exclusion de la phase de vie en œuvre,
- l'exclusion de la phase de fin de vie,
- l'exclusion de l'impact lié à la production de l'eau.

L'influence de chacune de ces hypothèses est évaluée à la vue des résultats de l'analyse du cycle de vie et de l'étude de sensibilité.

IV.4.2.1 Prise en compte de la vie en œuvre

La phase de vie en œuvre comprend notamment la dégradation des produits de traitement. Toutefois, réaliser une étude de sensibilité sur l'effet de la dégradation des produits nécessiterait de mener des études spécifiques *in situ* prenant en compte l'environnement réel du chantier. Toutefois, une réflexion peut avoir lieu pour évaluer les situations où cet aspect pourrait influencer le résultat final. De manière générale, la dégradation des produits de traitement conduirait à augmenter l'impact environnemental global. Ainsi, les situations où cette étape devrait être prise en compte correspondent à des situations où le traitement présente un bilan environnemental plus favorable que la variante non traitée.

Pour le traitement à la Permazyme, il serait ainsi pertinent de mener l'étude dans le cas de la situation n°1. Cependant, compte tenu du faible dosage utilisé et du fait que ses composés dérivent de la transformation de matières premières renouvelables, l'impact lié à la dégradation du produit a été jugé comme négligeable.

Pour le traitement au lignosulfonate, la fin de vie correspond à la dégradation du produit ou à son lessivage dans l'environnement. Or ces processus s'ils ont lieu induisent un impact environnemental supplémentaire non pris en compte jusque-là. Le bilan environnemental des variantes traitées se trouverait donc dégradé. Pour le traitement au lignosulfonate, l'impact du traitement est systématiquement supérieur à celui de la variante non traitée. Ainsi, la prise en compte de la dégradation du produit induirait inéluctablement une augmentation supplémentaire des impacts environnementaux. Compte tenu des objectifs généraux, il n'est donc pas nécessaire de mener cette étude complémentaire car le choix des variantes n'en serait pas modifié.

IV.4.2.2 Prise en compte de la fin de vie

La phase de fin de vie prend en compte la déconstruction de l'ouvrage et inclut le devenir des matériaux qui en sont issus (par exemple recyclage ou élimination par mise en décharge). En supposant que la durée de vie de l'ouvrage est supérieure à celle nécessaire à la dégradation des produits de traitement, le sol retrouve ses propriétés géotechniques initiales. Ainsi, il n'est fait aucune différence dans le devenir des matériaux pour l'ensemble des variantes considérées. De ce fait, l'impact environnemental associé à la fin de vie de l'ouvrage est supposé être identique pour l'ensemble des variantes et peut donc être exclu de l'étude.

IV.4.2.3 Prise en compte de l'ICV de l'eau

Prendre en compte l'impact environnemental de l'approvisionnement en eau (pompages, réalisation de bassins de rétention, forages, etc.) induirait une augmentation de l'impact environnemental proportionnelle aux quantités d'eau prélevées. Cependant, le calcul des intrants indique que dans les situations n°1 et 2, les quantités d'eau nécessaires pour les traitements sont plus faibles ou égales à

celles requises pour la mise en œuvre du sol non traité. Prendre en compte cet impact induirait donc une augmentation au moins égale des impacts entre variantes traitées et non traitées.

Dans la troisième situation, la variante non traitée ne requiert pas de consommation d'eau lors de la phase de mise en œuvre. Ainsi, son bilan environnemental n'est pas sensible à ce paramètre. Cette variante reste donc celle ayant l'impact environnemental le plus restreint.

Ainsi, dans l'ensemble des configurations étudiées, les hypothèses prises sur la frontière du système ne modifieraient pas le choix de la variante retenue.

IV.4.3 Influence des paramètres liés au traitement à la Permazyme

Un certain nombre d'hypothèses ont été posées pour calculer les bilans environnementaux des trois situations dans lesquelles le traitement à la Permazyme peut être considéré. L'étude de sensibilité doit dans un premier temps identifier les hypothèses pouvant potentiellement affecter le plus fortement le bilan environnemental. Une première partie a ainsi pour objectif d'identifier les hypothèses sur lesquelles portera l'étude de sensibilité, notamment en analysant la contribution relative de chaque phase du cycle de vie à l'impact total. Dans un second temps, le bilan environnemental de chaque situation est réévalué en considérant des hypothèses alternatives jugées pertinentes par rapport à l'objectif de l'étude. Par ailleurs, toutes les hypothèses ne sont pas évaluées systématiquement. En effet, le calcul des impacts détaillé précédemment montre qu'en fonction des situations, le traitement à la Permazyme peut conduire à réduire ou à augmenter l'impact environnemental. L'étude de sensibilité doit de ce fait adopter une stratégie différente selon les situations en cherchant dans le premier cas à tester les paramètres pouvant augmenter l'impact de la variante traitée (augmentation du dosage par exemple). Au contraire, lorsque la variante traitée a un impact environnemental supérieur à la variante non traitée, les hypothèses conduisant à réduire l'impact du traitement seront au cœur de l'étude.

IV.4.3.1 Champ de l'étude de sensibilité

Pour être pertinente, l'étude de sensibilité s'intéresse dans un premier temps à la contribution de chaque phase du cycle de vie à l'impact total calculé. Cette étape permet d'identifier les phases du cycle de vie sur lesquelles l'étude de sensibilité doit porter en priorité.

Le calcul de la répartition des impacts de la variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme montre que de manière générale, la phase de mise en œuvre est celle dont l'impact est le plus élevé, suivie de l'impact lié à la production du produit de traitement puis du transport.

La production de la Permazyme représente une proportion de l'impact variant assez fortement d'un indicateur à l'autre. Elle représente notamment 88 % de la production de déchets, 84 % de la destruction de l'ozone stratosphérique et 49 % de la contribution à l'acidification atmosphérique. La contribution aux autres indicateurs malgré une contribution inférieure à 10 % reste toutefois significative (Figure IV.8).

La phase de transport contribue de manière restreinte à l'impact global du traitement. En effet, mis à part la contribution de 6 % à l'indicateur « acidification atmosphérique », la contribution de cette phase est inférieure à 2 %. Ce résultat s'explique essentiellement par la faible distance de transport (1 km) considérée pour l'approvisionnement en eau. De plus, l'impact du transport de la Permazyme depuis les États-Unis est limité par les faibles quantités requises. L'effet d'une augmentation de la distance de transport de l'eau doit toutefois être évalué.

La phase de mise en œuvre est celle dont l'impact environnemental est de façon générale le plus élevé. Cet impact est essentiellement dû à la consommation de carburant des engins de chantier, ainsi qu'à l'eau nécessaire à l'humidification du sol.

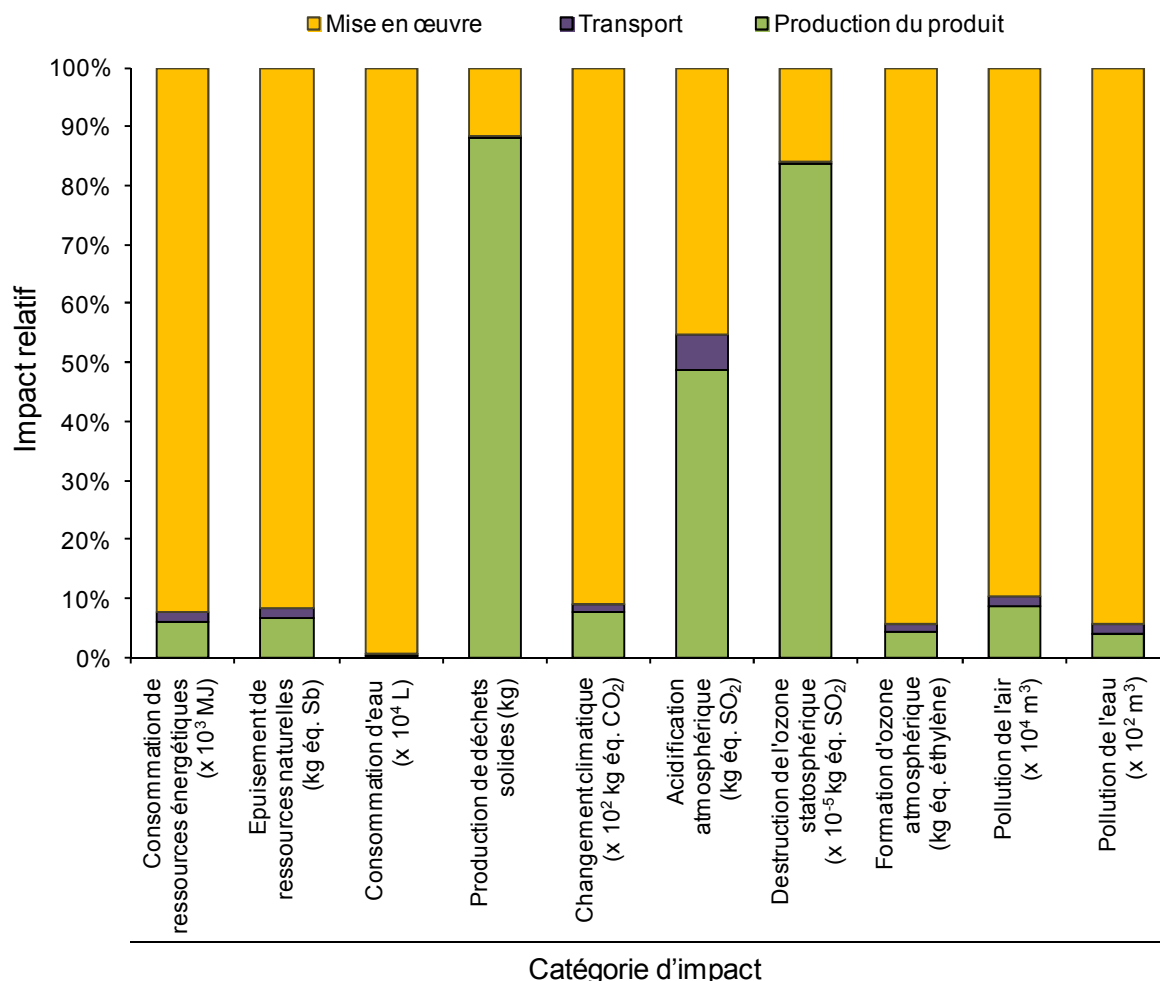


Figure IV.8 : Contribution de l'impact relatif de chaque phase du cycle de vie à l'impact total de la variante faisant intervenir le traitement à 0,002 % de Permazyme.

Compte tenu des contributions diverses de chaque phase du cycle de vie, l'étude de sensibilité porte sur différentes données d'entrée pouvant induire une modification du bilan environnemental. Cette étude est établie de façon différente selon la situation considérée et porte sur les points détaillés dans les paragraphes suivants.

a) ICV de la Permazyme

Dans la variante de référence, la Permazyme est considérée comme un alcool sulfate appliqué au dosage de 0,002 %. Cependant, il existe d'autres catégories de tensioactifs. Une variante consiste à considérer la Permazyme comme un alcool ethoxylate. Ce type de tensioactif est issu de la transformation de matières premières pétrolières et présente un impact environnemental plus important (Stalmans *et al.* 1995). Cette hypothèse est identifiée par le terme « ICV = AE » dans les graphiques suivants.

De même, il est possible d'envisager un dosage plus élevé pour la Permazyme. Le traitement à 0,01 % de SDS, un alcool sulfate ayant montré les mêmes types d'effets que le traitement à 0,002 % de Permazyme. Ainsi, l'impact d'un dosage 5 fois plus élevé en tensioactif sera étudié. *A contrario*, le produit de traitement pourrait être considéré comme un déchet ultime auquel cas l'ICV du produit pourrait être considéré comme nul « ICV = 0 », cette hypothèse revient à ne pas prendre en compte l'impact relatif à la production de la Permazyme.

b) Transport de l'eau

Dans le calcul des variantes, une distance de transport de l'eau de 1 km est prise pour effectuer les calculs. Cependant, des distances plus élevées pourraient être considérées ce qui correspondrait à des situations où l'eau serait moins facilement accessible que dans la situation de référence. L'effet d'une augmentation de la distance de transport de l'eau est évalué en considérant un transport sur 50 km « d = 50 km ».

c) Fonctionnement des engins de chantier

De façon générale, les hypothèses prises en compte pour évaluer le fonctionnement des engins et leur consommation ne seront pas modifiées car ces données sont issues du retour d'expérience sur les pratiques courantes des entreprises de terrassement et ne souffrent donc pas de fortes incertitudes. Toutefois, une hypothèse forte a été retenue concernant la mise en œuvre du sol non traité à l'état sec dans la situation n°2. Il est alors estimé que pour atteindre les mêmes performances qu'avec un traitement à la Permazyme, le compactage doit avoir lieu à une énergie correspondant à 170 % de l'énergie Proctor normale « E = 170 % EPN ». L'étude de sensibilité pourra également évaluer la situation qui considère que le traitement est équivalent à un compactage du sol non traité à 300 % de l'énergie Proctor normale « E = 300 % EPN ».

IV.4.3.2 Étude de sensibilité pour la situation n°1

Dans cette situation, la variante traitée présente un meilleur bilan environnemental que la variante non traitée. Pour juger de la robustesse du résultat, le bilan environnemental est recalculé en considérant les hypothèses dont l'effet est d'augmenter l'impact environnemental de la variante traitée. Sont ainsi étudiés les cas où l'ICV de la Permazyme est égal à celui d'un alcool ethoxylate et celui où le dosage en produit est augmenté à 0,01 %.

Pour l'hypothèse concernant le dosage, les résultats indiquent qu'une augmentation de 0,002 à 0,01 % induit une augmentation de l'impact environnemental du traitement. Toutefois, les indicateurs restent inférieurs à ceux de la variante non traitée à l'exception de la production de déchets, de l'acidification atmosphérique et de la destruction de la couche d'ozone (Figure IV.9). En effet, il s'agit des catégories d'impact pour lesquels la phase de production du produit présente la plus forte contribution (Figure IV.8).

Les impacts calculés en considérant l'ICV de la Permazyme comme égal à celui d'un alcool sulfate ou d'un alcool ethoxylate donnent des résultats similaires pour l'ensemble des catégories d'impacts. L'impact total n'est donc pas fortement affecté par ce changement.

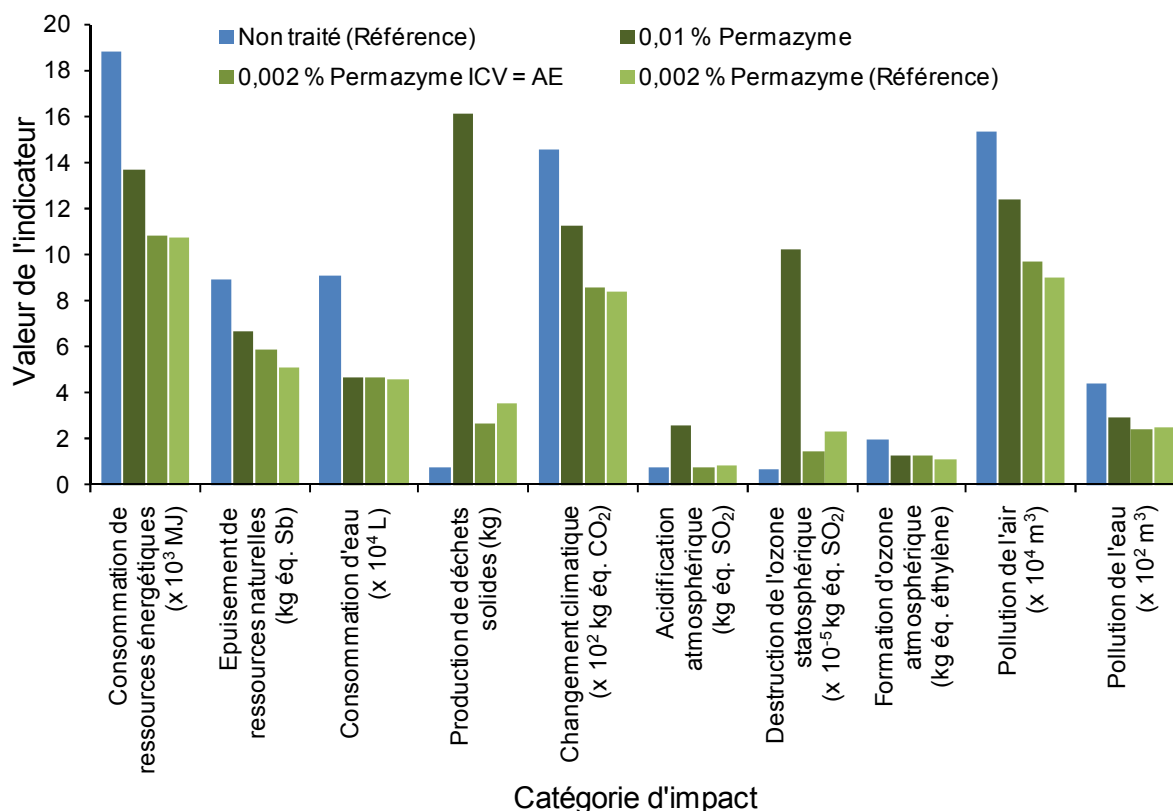


Figure IV.9 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des variantes traitées à la Permazyme en fonction des différentes hypothèses sur l'ICV du produit.

Dans cette situation, l'hypothèse considérant la Permazyme comme un déchet n'est pas évaluée car elle est favorable à la variante traitée. De même, une distance de

transport de l'eau augmentée conduirait à dégrader de façon plus importante le bilan de la variante non traitée. En effet, cette dernière variante nécessite le double du volume d'eau requis pour le traitement à la Permazyme. Ainsi, du point de vue du bilan environnemental, le choix du traitement se trouverait renforcé par l'augmentation de la distance de transport de l'eau entre son lieu de prélèvement et son lieu de mise en œuvre.

IV.4.3.3 Étude de sensibilité pour la situation n°2

Dans cette configuration, les impacts calculés pour la variante non traitée et celle faisant intervenir le traitement à la Permazyme sont équivalents. Ainsi, du point de vue du bilan environnemental, toute réduction de l'impact de la variante traitée tendrait à favoriser le choix de cette variante. Au contraire, toute augmentation de l'impact du traitement conduirait à écarter cette variante.

Il n'est pas nécessaire dans cette configuration de mener l'ensemble des calculs de sensibilité. Par exemple, considérer que le produit de traitement est équivalent à un déchet conduirait à améliorer le bilan environnemental de la variante traitée et tendrait donc à favoriser le choix de cette variante. Considérer des distances de transport de l'eau de 50 km revient à augmenter l'impact des deux variantes de façon identique car le volume d'eau transporté est identique pour les deux variantes.

L'influence de l'énergie de compactage peut toutefois être évaluée en considérant que le sol non traité doit être compacté à une énergie de 300 % de l'énergie Proctor normale pour atteindre les performances du traitement à la Permazyme. Sous cette hypothèse, l'impact environnemental de la variante non traitée est supérieur de 10 à 20 % par rapport à la variante traitée pour 8 des 10 catégories d'impact (Figure IV.10). De même, l'hypothèse considérant le produit de traitement comme un déchet (ICV = 0) tend à réduire l'impact du traitement notamment pour les catégories « production de déchets solides » et « destruction de l'ozone stratosphérique ». Cette dernière hypothèse réduit l'impact environnemental de la variante traitée. Dans le cas où les deux hypothèses de sensibilité sont combinées, le traitement permettrait de réduire l'impact environnemental de 20 % pour la plupart des catégories.

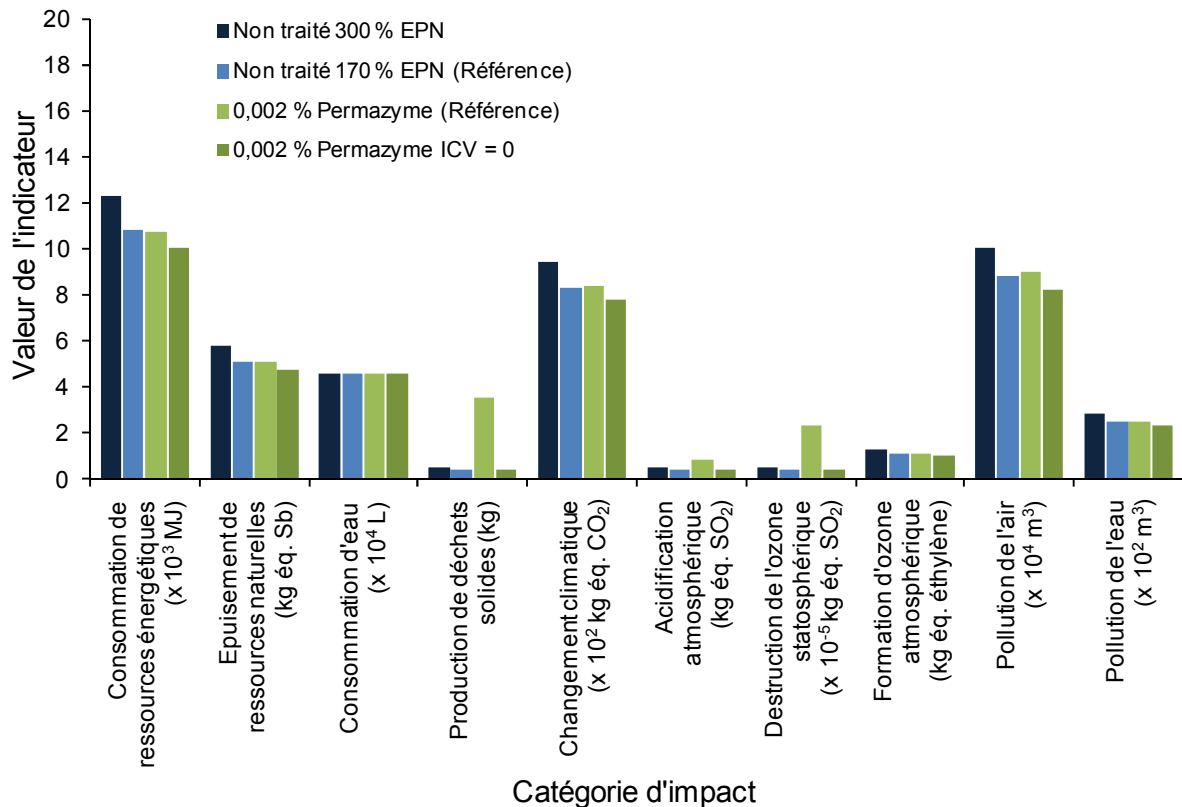


Figure IV.10 : Impacts environnementaux des variantes non traitées en prenant en compte un compactage à 300 % et 170 % de l'EPN et pour les variantes traitées à la Permazyme pour la variante de référence et celle considérant un ICV nul.

IV.4.3.4 Étude de sensibilité pour la situation n°3

Dans cette situation, la variante faisant intervenir le traitement à la Permazyme induit un impact environnemental supérieur dans l'ensemble des 10 catégories. L'étude de sensibilité porte ainsi sur les hypothèses conduisant à réduire l'impact de la variante faisant intervenir le traitement en considérant le produit comme un déchet (ICV = 0). Les résultats obtenus sous cette hypothèse montrent toutefois que la réduction est insuffisante pour rendre le traitement intéressant en termes de bilan environnemental (Figure IV.11). Pour les autres hypothèses, leur prise en compte reviendrait à dégrader l'impact environnemental, elles ne seront donc pas reprises ici.

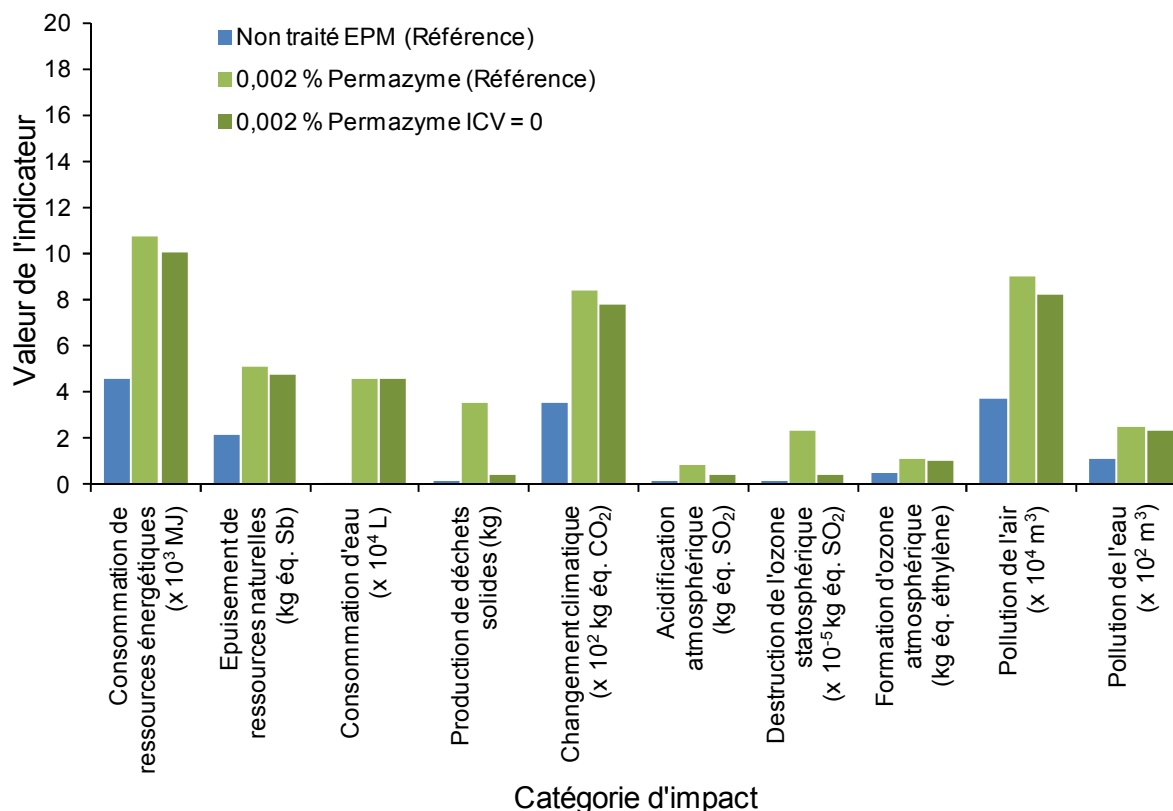


Figure IV.11 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des variantes traitées à la Permazyme en considérant ou non l'ICV de la Permazyme.

IV.4.3.5 Bilan pour le traitement à la Permazyme

L'étude de sensibilité montre que dans l'ensemble des trois situations, les modifications des données d'entrée n'engendrent pas de changement dans le choix des variantes. Par exemple, dans la première situation, le choix de l'ICV de la Permazyme ne modifie que faiblement l'impact de la variante traitée. De même, une augmentation du dosage autour de 0,01 % n'induit pas d'augmentation suffisante de l'impact environnemental pour rendre la variante non traitée plus avantageuse. Au contraire, si les distances de transport de l'eau augmentent et que l'impact de la production du produit est réduit, le bilan environnemental de la variante traitée sera amélioré.

Pour la seconde situation, le traitement devient intéressant uniquement si un compactage de l'ordre de 300 % de l'énergie Proctor normale est nécessaire pour atteindre les mêmes performances que le sol non traité. En deçà de cette énergie, les impacts apparaissent comme équivalents.

Enfin, dans la dernière situation considérée, la variante non traitée présente un impact environnemental moindre y compris lorsque des hypothèses favorables à la variante traitée sont prises.

L'étude de sensibilité montre donc une bonne robustesse dans le choix des variantes de mise en œuvre.

IV.4.4 Traitement au lignosulfonate

Pour le traitement au lignosulfonate, les résultats obtenus au cours de l'évaluation environnementale montrent que dans l'ensemble des situations, le bilan environnemental est dégradé par l'utilisation du traitement. L'étude de sensibilité portera donc essentiellement sur les hypothèses qui conduiraient à limiter l'impact du traitement (impact environnemental du produit, distance de transport) et des aspects pouvant contribuer à augmenter l'impact des variantes non traitées.

IV.4.4.1 Champ de l'étude de sensibilité

Le calcul de la contribution des différentes phases du cycle de vie à l'impact environnemental de la variante traitée permet d'identifier la phase de production du lignosulfonate comme celle ayant la plus forte contribution. L'impact associé représente une proportion supérieure à 89 % pour chacune des catégories (Figure IV.12).

La phase de transport représente une proportion maximale de 5 % de l'impact environnemental total. Quant à l'étape de mise en œuvre, elle participe au maximum à 6 % de l'impact du système au cours de son cycle de vie.

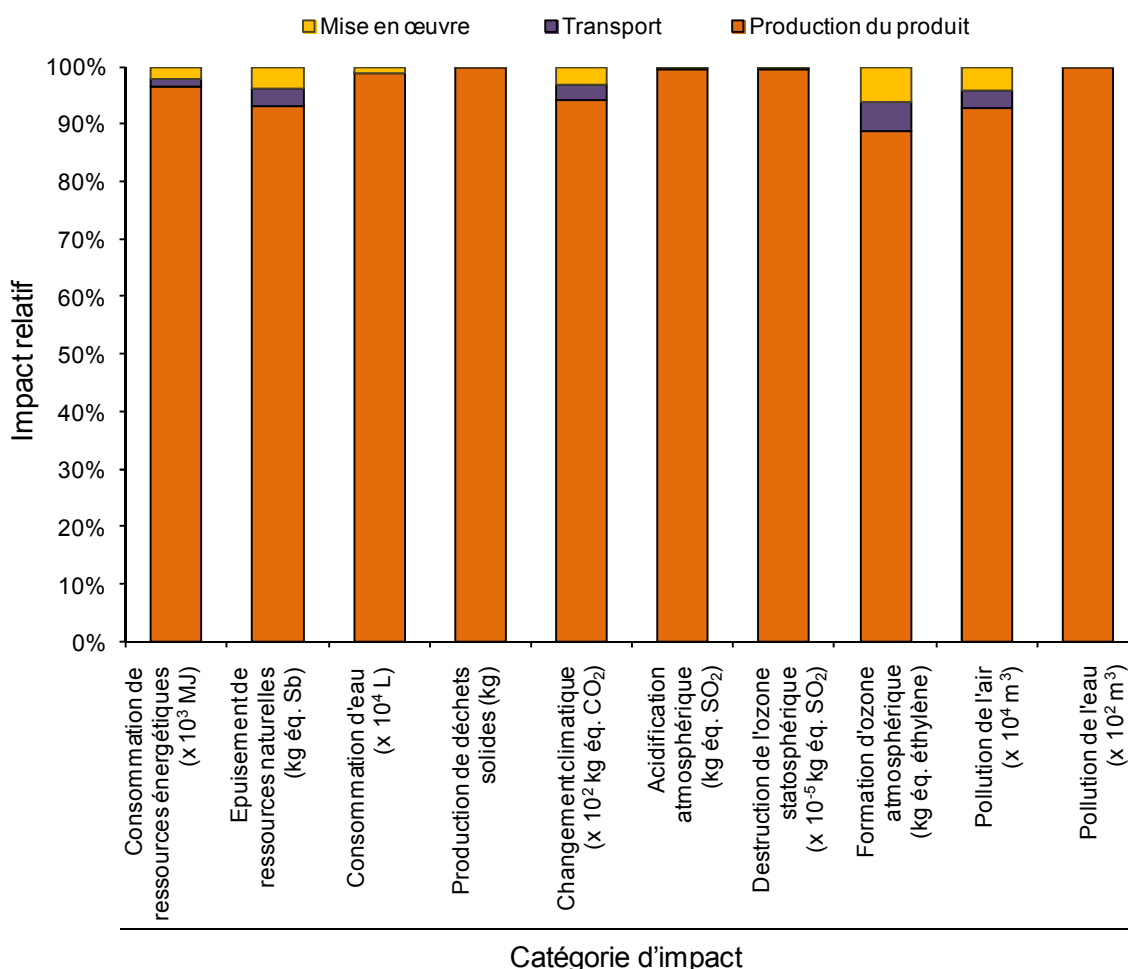


Figure IV.12 : Contribution relative de l'impact de chaque phase du cycle de vie à l'impact total de la variante faisant intervenir le traitement à 2,0 % de lignosulfonate.

Le calcul du bilan environnemental de la variante faisant intervenir le traitement au lignosulfonate montre des impacts environnementaux 16 à 2400 fois supérieurs à ceux de la variante non traitée dans la situation n°1 (Figure IV.6 p. 166). L'étude de sensibilité aura donc pour vocation de s'intéresser aux hypothèses pouvant réduire le bilan environnemental du traitement afin de déterminer sous quelles hypothèses le traitement est en mesure de présenter un meilleur bilan environnemental par rapport à la variante de mise en œuvre du sol non traité. L'étude de sensibilité porte sur les points détaillés dans les paragraphes suivants.

a) ICV du lignosulfonate

Dans la variante de référence, le lignosulfonate est considéré comme un produit valorisé par l'entreprise sur le marché et l'ICV du produit considère que le lignosulfonate supporte les émissions de l'entreprise proportionnellement aux quantités produites (Modahl & Vold, 2011). Compte tenu de la participation de l'étape de production du lignosulfonate à l'impact total de la variante, le résultat de l'étude sera sensible à l'ICV du produit. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle le produit est considéré comme un déchet (hypothèse « ICV = 0 ») doit être évaluée.

b) Distance de transport

L'approvisionnement en lignosulfonate nécessite de transporter plusieurs tonnes de produit sur des distances importantes (560 km pour la variante de référence). L'influence de la distance de transport sera donc également évaluée.

IV.4.4.2 Étude de sensibilité pour la situation n°1

Compte tenu du fort impact environnemental de la production du lignosulfonate, la première hypothèse testée est celle d'un ICV nul. Cette hypothèse revient à considérer le produit comme un déchet des industries papetières. Sous cette hypothèse, l'impact environnemental de la variante est réduit de plus de 90 % (Figure IV.12). Toutefois, les impacts calculés pour chaque catégorie montrent que la réduction n'est pas suffisante pour présenter un avantage environnemental par rapport à la variante non traitée (Figure IV.13). En effet, seule la catégorie d'impact estimant la consommation d'eau se révèle être favorable au traitement en réduisant le volume d'eau consommé à $5,5 \cdot 10^4$ L au lieu de $9,7 \cdot 10^4$ L pour la variante non traitée. *A contrario*, la consommation d'énergie demeure supérieure d'environ 80 %.

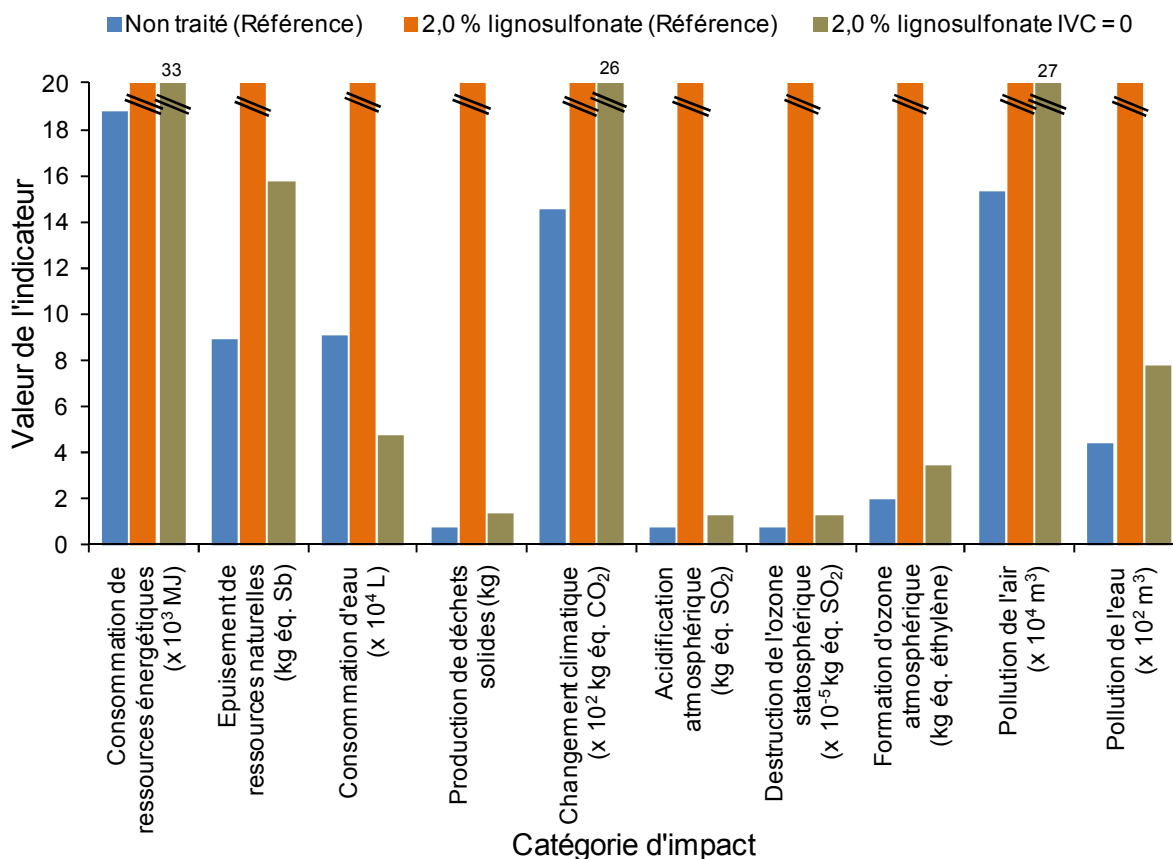


Figure IV.13 : Impacts environnementaux de la variante non traitée et des deux variantes traitées en considérant le lignosulfonate comme un produit industriel (Référence) ou comme un déchet (ICV = 0).

La seconde hypothèse pouvant être testée est celle d’une réduction de la distance de transport du lignosulfonate. Toutefois, d’après les résultats présentés précédemment (Figure IV.12), réduire fortement la distance de transport ne conduirait qu’à une réduction maximale de 5 % des impacts environnementaux. L’hypothèse d’une réduction de la distance de transport peut toutefois être testée en combinaison avec l’hypothèse « ICV = 0 ». L’effet d’une réduction de la distance de transport du lignosulfonate à 10 km « d = 10 km » sera testée. Sous ces hypothèses combinées, les valeurs obtenues se rapprochent des impacts environnementaux de la variante non traitée (Figure IV.14). Ainsi, à l’exception de la catégorie d’impact « consommation d’eau » dont l’impact est environ réduit de moitié, les valeurs calculées sont similaires à la variante non traitée.

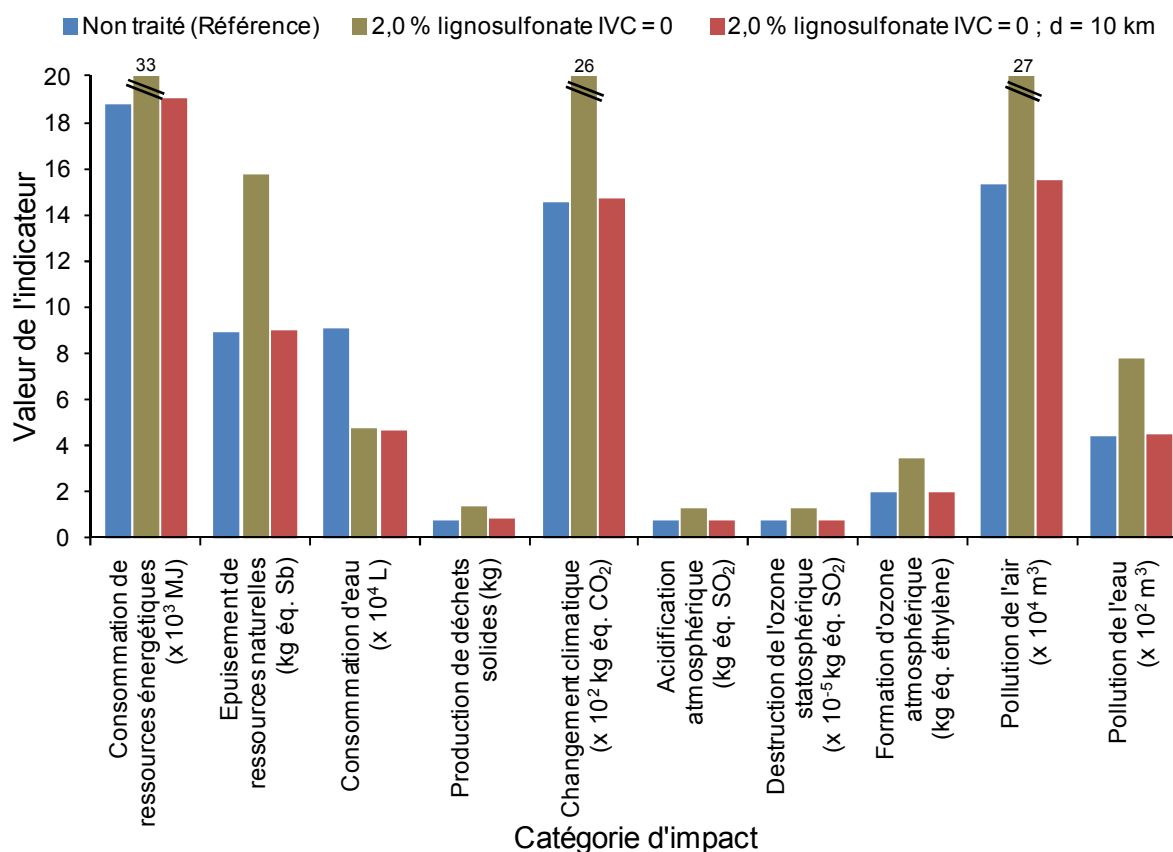


Figure IV.14 : Impacts environnementaux pour la variante non traitée et les variantes traitées au lignosulfonate en fonction des hypothèses sur l'ICV du produit et sur la distance de transport.

La situation envisagée est toutefois peu probable car elle nécessite de considérer le lignosulfonate comme un déchet, ce qui n'est pas le cas, tout en ayant un chantier à proximité directe d'une usine de production. Par ailleurs, le traitement au lignosulfonate n'a d'application techniquement intéressante que pour des sols situés dans des états hydriques secs ou très secs (cf. Chapitre III). Cependant, comme les usines de production de lignosulfonate sont généralement situées à proximité d'aires boisées, la probabilité d'une conjonction de l'ensemble de ces situations est très faible. Enfin, l'économie d'eau qui pourrait résulter de l'utilisation du traitement dans ces conditions particulières est atténuée par le fait que les papeteries sont situées à proximité de sources d'eau abondantes favorisant la mise en œuvre du sol sans traitement.

IV.4.4.3 Étude de sensibilité pour la situation n°2

Dans cette situation, le traitement est désavantagé par l'impact élevé de la production du produit de traitement et par l'impact de son transport. L'étude des flux entrant dans le système, montre également que la consommation des engins de chantier lors de la réalisation de la variante traitée est nécessairement plus élevée pour la variante traitée (Tableau IV.7). En effet, la simple mise en œuvre du traitement nécessite 492 L de diesel contre 282 L pour la variante non traitée et ce

malgré l'augmentation de l'énergie de compactage alors requise (compactage à 170 % de l'EPN).

Le bilan environnemental de la variante considérant le traitement au lignosulfonate sera donc systématiquement supérieur à celui de la variante non traitée dans cette situation. Le traitement au lignosulfonate ne présente donc pas d'intérêt environnemental dans cette configuration.

IV.4.4.4 Étude de sensibilité pour la situation n°3

Dans cette situation, le seul intrant pour la variante non traitée correspond au carburant consommé par le compacteur. Cette consommation s'élève à 119 L (Tableau IV.8). Cependant, le simple fait de mélanger le lignosulfonate avec le sol en utilisant un pulvimixeur nécessite 228 L de diesel. L'impact environnemental du traitement au lignosulfonate sera donc systématiquement supérieur à celui de la variante non traitée.

IV.4.4.5 Bilan pour le traitement au lignosulfonate

L'étude de sensibilité a montré que la part principale de l'impact environnemental des variantes faisant intervenir le traitement au lignosulfonate est due à la production du produit lui-même et aux quantités requises. L'étude de sensibilité s'est donc essentiellement portée sur l'ICV du lignosulfonate. Toutefois, cette étude n'est pertinente que dans la situation n°1. En effet, le simple bilan des flux entrants permet de conclure à un impact moindre des variantes non traitées dans les situations n°2 et 3.

Dans la première situation, même avec l'hypothèse attribuant un ICV nul à la production du lignosulfonate, l'impact environnemental reste supérieur à l'impact de la variante non traitée du fait de l'impact de l'étape de transport.

IV.4.5 Évaluation financière : exemple du traitement à la Permazyme

Un aspect essentiel dans le choix de variantes constructives n'a, jusque là, pas été pleinement pris en compte. Il s'agit des aspects financiers. Le choix de les exclure dans un premier temps a été pris car les paramètres financiers sont essentiellement régis par les marchés et la réglementation en vigueur lors du projet. Or ces paramètres sont par nature très variables et sujet à des fluctuations rapides. Une évaluation financière a toutefois été menée par le service d'étude de prix de DTP Terrassement. Cette étude porte sur le cas du traitement du limon de Moussy à la Permazyme dans les situations n°1 et 2, là où le traitement présente à la fois un intérêt technique et environnemental. Les calculs sont effectués pour le système considéré au cours de l'étude environnementale. Les valeurs sont normalisées par rapport à un volume d'un mètre cube de sol. Les principales hypothèses financières

considérées portent sur la distance de transport de l'eau, sur son coût et sur le coût de la Permazyme.

Le premier jeu d'hypothèses considère une distance de transport de l'eau de 1 km pour un coût de l'eau nul ce qui équivaut à un approvisionnement en rivière.

Le second jeu d'hypothèse prend en compte une distance de transport de l'eau de 50 km pour un coût de 1 euro le mètre cube.

Le coût de la Permazyme annoncé par le fournisseur est voisin de 120 €/kg, une étude de sensibilité est également effectuée sur ce montant en considérant les prix de 120 ; 50 et de 0 €/kg.

Dans la première situation, pour une distance de transport de l'eau de 1 km et un prix d'achat du mètre cube d'eau nul, le coût du mètre cube de sol mis en œuvre pour la variante non traitée est estimé à 1,78 €/m³ contre 5,31 €/m³ pour la variante traitée (Tableau IV.9). Le traitement est de ce fait plus onéreux. La prise en compte d'une distance de transport plus élevée et d'un coût de l'eau non nul, hypothèses favorables à la variante traitée, ne modifient pas le constat.

Tableau IV.9 : Estimation des coûts de la mise en œuvre d'un mètre cube de sol pour le système considéré en fonction des hypothèses portant sur la distance de transport de l'eau, sur son prix d'achat et sur le prix d'achat de la Permazyme.

Hypothèses	Situation n°1		Situation n°2	
	Non traité	0,002 % Permazyme	Non traité	0,002 % Permazyme
Permazyme = 120 €/kg				
d = 1 km ; eau = 0 €/m ³	1,78 €/m ³	5,31 €/m ³	1,21 €/m ³	5,31 €/m ³
d = 50 km ; eau = 1 €/m ³	3,56 €/m ³	6,33 €/m ³	2,28 €/m ³	6,33 €/m ³
Permazyme = 50 €/kg				
d = 1 km ; eau = 0 €/m ³	1,78 €/m ³	2,82 €/m ³	1,21 €/m ³	2,82 €/m ³
d = 50 km ; eau = 6 €/m ³	4,09 €/m ³	4,10 €/m ³	2,81 €/m ³	4,10 €/m ³
Permazyme = 0 €/kg				
d = 1 km ; eau = 0 €/m ³	1,78 €/m ³	1,04 €/m ³	1,21 €/m ³	1,04 €/m ³
d = 50 km ; eau = 1 €/m ³	3,56 €/m ³	2,05 €/m ³	2,28 €/m ³	2,05 €/m ³

Dans l'hypothèse où le prix de la Permazyme est réduit à 50 €/kg, le coût de la variante traitée est réduit. Une distance de transport de l'eau de 50 km pour un coût d'achat de l'eau de 6 € le mètre cube d'eau conduit alors à un coût identique entre les deux variantes (4,10 €/m³).

Enfin, dans le cas où la Permazyme ne coûterait rien, le traitement devient dans cette configuration intéressant financièrement y compris lorsque l'eau est facilement accessible.

Dans la situation n°2, le traitement ne devient financièrement intéressant qu'à partir du moment où le coût du produit de traitement est fortement réduit. Pour l'hypothèse la plus favorable au traitement, le coût de mise en œuvre du sol serait alors de 2,05 €/m³ contre 2,28 €/m³ pour la variante non traitée.

L'étude financière menée n'a pas pour vocation de réaliser un chiffrage réel de la construction d'un ouvrage en sol traité mais permet de souligner quelques spécificités favorables financièrement au traitement.

Ainsi, plus l'eau est difficile à acquérir, par son coût d'achat, de production ou par la distance de transport nécessaire, plus le coût de la variante non traitée est augmenté.

De même, le traitement sera moins onéreux si le prix d'achat de la Permazyme est réduit. Le remplacement de la Permazyme par un tensioactif moins onéreux est en ce sens une voie à explorer.

IV.5 Conclusion

L'analyse du cycle de vie est une démarche itérative visant à répondre à un objectif précis qui est ici d'évaluer pour plusieurs situations données, la variante de mise en œuvre présentant le meilleur bilan environnemental. L'étude environnementale a ainsi montré que le choix de la variante ayant l'impact le plus faible dépendait avant tout de la situation considérée. En effet, les traitements ne présentent pas les mêmes intérêts en fonction des variantes auxquelles ils sont censés se substituer.

Pour le traitement du limon de Moussy à la Permazyme, la variante traitée est à privilégier du point de vue environnemental par rapport à la mise en œuvre du sol non traité mis en œuvre à une teneur en eau permettant son compactage à l'énergie Proctor normale (état moyen du GTR). Dans cette situation (n°1), 7 indicateurs sur 10 présentent une réduction de 40 à 50 % de leurs impacts. L'étude de sensibilité indique alors que même si le dosage est multiplié par 5 ou que l'ICV du produit est moins avantageux, la variante traitée reste à privilégier. Dans le cas, où le compactage a lieu à une teneur en eau finale identique (situation n°2), les impacts environnementaux sont équivalents entre variante traitée et non traitée. Toutefois, l'étude de sensibilité montre que si le traitement permet de se substituer à un compactage à 300 % de l'énergie Proctor normale, une réduction de 10 à 20 % de 8 indicateurs sur 10 est observée. Considérer le produit comme un déchet est également favorable au traitement et permet alors d'observer une amélioration pour l'ensemble des indicateurs. Au contraire, dans la troisième situation, lorsque le

traitement est envisagé en remplacement d'un compactage à l'énergie Proctor modifiée sans action sur la teneur en eau, l'impact environnemental de la variante traitée est plus élevé, y compris lorsque le produit est considéré comme un déchet.

Pour le traitement au lignosulfonate, l'impact environnemental est fortement dégradé pour l'ensemble des trois variantes. Cette dégradation est essentiellement liée à l'étape de production du lignosulfonate et dans une moindre mesure à son transport. Toutefois, l'étude de sensibilité montre que même lorsque des hypothèses très favorables à la variante traitée sont prises (ICV = 0), l'impact du traitement reste supérieur à l'impact des variantes de mise en œuvre du sol non traité à l'exception de la consommation d'eau réduite environ de moitié. La situation la plus favorable au traitement est observée pour la combinaison des hypothèses « ICV = 0 » et « distance de transport réduite à 10 km ». L'impact est alors équivalent à celui de la variante non traitée à l'exception de la consommation d'eau, réduite de moitié. Toutefois, regrouper ces hypothèses revient à considérer une situation irréaliste.

D'un point de vue méthodologique, la démarche entreprise montre qu'il n'est pas systématiquement nécessaire de mener le calcul des impacts à son terme mais que la seule analyse des flux entrant permettait parfois d'y répondre. Dans ce cas, un gain de temps conséquent est réalisé.

Certaines limites de l'étude doivent également être rappelées. En effet :

- les valeurs calculées sont uniquement valables sous les hypothèses retenues et pour le système décrit. Ainsi, aucune comparaison avec d'autres études environnementales ne peut avoir lieu sans qu'il n'y ait une correspondance parfaite entre le système et l'ensemble des hypothèses associées.
- pour être pertinente, l'étude nécessite une connaissance pointue du système sur lequel l'ACV est conduite ce qui requiert une bonne connaissance du domaine des travaux de terrassement associée à une maîtrise des pratiques de l'ACV.
- les données d'inventaire du cycle de vie des intrants ne sont pas toujours disponibles ou appropriées ce qui nécessite de trouver des solutions de substitution. Cette étape est fréquemment la plus chronophage. Par ailleurs, la recherche d'ICV de substitution requiert une bonne connaissance des domaines d'où est issue l'ICV.
- les données d'inventaire du cycle de vie peuvent évoluer au cours du temps et au fil des modifications des connaissances scientifiques et technologiques. Les impacts ont ainsi été calculés avec les données les plus récentes ayant pu être obtenues.

Conclusion générale : synthèse des résultats des propriétés géotechniques et du bilan environnemental de l'utilisation de produits non traditionnels de traitement des sols

Les acteurs du secteur des travaux publics sont actuellement confrontés aux problématiques du développement durable. Les entreprises doivent garantir les aspects techniques, économiques et également environnementaux des projets. Dans le domaine des terrassements, les défis visant à réduire l'impact environnemental des ouvrages nécessite d'optimiser la valorisation des sols extraits dans l'emprise des chantiers y compris ceux n'ayant pas les propriétés mécaniques requises. L'une des solutions consiste alors à traiter les sols pour en modifier les caractéristiques mécaniques. Dans le cadre de cette étude, l'intérêt s'est principalement porté sur les produits de traitement dérivant de la transformation de matières premières renouvelables. Cette particularité les différencie des produits comme la chaux ou les ciments issus de la transformation de matières premières minérales non renouvelables. Parmi les produits non traditionnels, trois catégories ont été retenues : les solutions dites « enzymatiques », les lignosulfonates et les solutions acides. L'objectif de l'étude dépasse le cadre de la simple évaluation de leurs intérêts techniques et de leurs modalités d'actions et vise également à prendre en compte les préoccupations liées aux problématiques environnementales.

Le premier chapitre dresse un état des lieux de l'utilisation de produits non traditionnels dont les composés sont généralement issus de sous produits industriels. Compte tenu de leur diversité de nature, une classification est proposée. Cependant, au sein d'une même catégorie de produits, il n'y a pas unicité des conclusions concernant leurs effets. Il ressort toutefois, que l'action de ces traitements se distingue clairement des effets observés après ajout de chaux ou de ciments. Afin d'évaluer les impacts environnementaux des traitements de façon globale, la démarche d'analyse du cycle de vie est également présentée dans ce premier chapitre.

Le second chapitre détaille, les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour évaluer les effets des trois traitements sur les propriétés géotechniques de différents sols couramment rencontrés sur chantier de terrassement : un limon, une argile, et deux types de sables. Les protocoles utilisés diffèrent des procédures normalisées car les produits non traditionnels sont pour partie des solutions aqueuses. L'origine, la composition et les propriétés des produits de traitement sont exposées. Puis, après une description des caractéristiques géotechniques des sols non traités, une dernière section présente quelques résultats des traitements à la chaux et au ciment pour mettre en perspective l'action des produits non traditionnels.

Le troisième chapitre s'intéresse aux effets des trois traitements sur les différents sols et vise à proposer des applications pour chaque association testée. L'étude de

l'évolution des caractéristiques des sols traités et une réflexion sur leur mode d'action permettent d'appréhender les spécificités de ces traitements dont les molécules organiques tendent à se dégrader au cours du temps. À l'issue de chaque section consacrée à un produit, un bilan porte sur les applications potentielles qui émanent des résultats. Les traitements du limon de Moussy à la Permazyme et au lignosulfonate présentent les meilleures perspectives d'utilisation en facilitant le compactage du côté sec de l'optimum. Cet effet conduit potentiellement à réaliser des économies d'eau et d'énergie par rapport à la mise en œuvre du sol non traité. L'utilisation de ce matériau aurait par ailleurs été possible à condition d'apporter le supplément d'énergie de compactage et d'eau requis pour sa mise en œuvre.

Le quatrième chapitre aborde les applications des traitements sous l'angle du bilan environnemental. Il s'agit alors d'évaluer l'impact environnemental des variantes sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage en terre. L'évaluation environnementale est effectuée par la méthode de l'analyse du cycle de vie pour un système considérant l'ensemble des étapes affectées par le choix d'un traitement. Les impacts sont calculés grâce à la méthode d'évaluation définie dans la norme française relative à la déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction NF P 01-010. La comparaison des impacts entre variantes traitées et non traitées sert alors à préciser les conditions pour lesquelles les traitements réduisent l'impact environnemental de l'ouvrage.

L'ensemble des résultats techniques et environnementaux permet de déduire les conclusions détaillées par la suite et de proposer une approche technique et environnementale pour évaluer les potentialités d'un traitement lors de l'emploi de matériaux de terrassement.

a) Effets des traitements sur les propriétés hydromécaniques des sols

Le premier constat établi dans la littérature et confirmé par les résultats de l'étude, est que les trois traitements non traditionnels étudiés ont des effets différents des traitements à la chaux ou au ciment. Ainsi, il n'est par exemple pas observé de phénomène de prise qui conduirait à une amélioration progressive des propriétés des sols traités. De plus, les produits ont la particularité de se dégrader au cours du temps du fait de la biodégradabilité de la matière organique qui les constitue. Cette spécificité nécessite de réaliser des essais complémentaires pour évaluer les effets de cette dégradation sur le comportement des sols comme illustré pour le traitement du limon de Moussy à la Permazyme.

Les résultats obtenus montrent que le comportement hydromécanique des sols traités dépend essentiellement des facteurs suivants.

- La nature du sol et du produit de traitement, car pour un même traitement, certains sols voient leurs propriétés géotechniques modifiées alors que d'autres sols ne réagissent pas. Ainsi, le traitement du limon de Moussy à la Permazyme montre une modification de la courbe de compactage alors que

l'argile de Couthenans n'est pas affectée dans les mêmes conditions. Pour le traitement au lignosulfonate, le compactage du limon est facilité du côté sec de l'optimum, alors qu'il réduit l'efficacité du compactage de l'argile.

- Des conditions de cure, dont les effets ont été mis en évidence en particulier pour le traitement au lignosulfonate. Un séchage du limon et de l'argile traités entraîne une augmentation de la résistance à la compression simple des éprouvettes de l'ordre d'un tiers par rapport au sol non traité dans les mêmes conditions. Au contraire, à teneur en eau constante, les résistances à la compression simple pouvaient être dégradées par le traitement et n'évoluaient pas avec le temps de cure.

Les applications définies concernent essentiellement le compactage du limon de Moussy traité à la Permazyme. En effet, le traitement permet de faciliter le compactage du limon du côté sec de l'optimum sans que les caractéristiques d'identification ou la microstructure du sol ne soient modifiées. Les autres sols testés ne réagissent toutefois pas au traitement et aucune application particulière n'a pu être déduite.

Pour le traitement au lignosulfonate, un effet similaire est observé lors des essais de compactage. L'effet le plus marqué est alors relevé pour un dosage de 2,0 %. Cependant, le traitement tend au contraire à dégrader les propriétés de compactage et de l'argile. Pour l'ensemble des sols traités, l'apport de lignosulfonate diminue la portance à teneur en eau et masse volumique sèche donnée.

Le traitement au produit acide n'a, quant à lui, montré aucun effet significatif sur les caractéristiques hydromécaniques des sols.

La diversité de la réactivité des sols en fonction de la nature des produits de traitement ne permet pas de généraliser l'action des produits non traditionnels. Il est de ce fait nécessaire de qualifier leur action au cas par cas afin d'identifier les apports techniques qu'ils peuvent induire. Par ailleurs, lors de la définition des variantes de mise en œuvre du limon de Moussy, les traitements peuvent être substitués par une mise en œuvre du sol non traité à une énergie de compactage ou teneur en eau plus élevée. Les performances techniques atteintes sont alors identiques. L'évaluation environnementale permet ensuite de comparer les impacts des variantes pour identifier celle dont l'impact sur l'environnement est le plus limité.

b) Évaluation environnementale des applications des traitements non traditionnels

Le bilan environnemental effectué sur les variantes de mise en œuvre du limon nécessite une définition claire de l'objectif recherché, il s'agit ici d'identifier dans différentes situations de mise en œuvre si les traitements permettent de réduire l'impact environnemental du système par rapport à une variante non traitée.

Certaines précautions doivent être prises lors du déroulement de l'étude environnementale.

- Il s'agit dans un premier temps de fixer un objectif à l'étude. Ici, l'objectif est de comparer les bilans environnementaux de variantes traitées et non traitées pour identifier la variante ayant l'impact environnemental le plus faible à performances techniques équivalentes.
- Pour répondre à l'objectif, un système caractérisé par son unité fonctionnelle doit être précisément défini. Le système intègre l'ensemble des processus pris en compte dans l'étude. Les méthodes de calcul des flux entrants doivent alors être précisées (retour d'expérience, fascicule de documentation, etc.). Cette étape nécessite une connaissance précise du déroulement technique des chantiers, des types d'engins utilisés, mais aussi de leur rendement et de leur consommation en carburant. De plus, La démarche suivie est une démarche comparative permettant d'effectuer un certain nombre de simplifications en retirant du système l'ensemble des processus identiques entre variantes.
- L'origine des données d'ICV doit être clairement identifiée. En cas de lacune dans les ICV, une expertise précise doit être apportée pour trouver une alternative pouvant se substituer au manque de données.
- La méthode permettant le calcul de l'impact environnemental doit être identifiée. Au cours de cette étude, la méthode décrite dans la norme NF P 01-010 a été utilisée.
- Au cours du déroulement de l'étude, la variante ayant l'impact environnemental le plus faible peut être identifiée dans certains cas dès la phase de quantification des intrants.
- Les hypothèses fortes retenues sont à vérifier dans une démarche de sensibilité effectuée en fonction des résultats obtenus à l'issue de cette étude les conclusions préalables sont complétées des éventuelles conditions particulières ayant pu émerger.

L'étude environnementale porte essentiellement sur les applications définies pour le traitement du limon de Moussy à la Permazyme et au lignosulfonate à condition que la teneur en eau du sol en place soit située du côté sec de l'optimum. Les résultats techniques obtenus présentent alors les meilleures potentialités en termes d'apport technique et de réduction de l'impact environnemental. Les autres variantes possibles n'ont pas montré de modification conduisant à des applications intéressantes et ne sont donc pas étudiées sous l'aspect de l'analyse du cycle de vie.

Les résultats de l'analyse du cycle de vie ont principalement mis en évidence l'intérêt du traitement à la Permazyme dans la situation où le traitement intervient en remplacement d'une humidification suffisante pour que le sol non traité puisse être

compacté à l'énergie Proctor normale (situation n°1). Dans cette situation, intérêts techniques et environnementaux se trouvent alors conjugués.

Quant au traitement au lignosulfonate, aucun avantage environnemental n'a pu être mis en évidence pour les situations considérées. En effet, les économies locales d'énergie et d'eau escomptées sont largement compensées par l'impact environnemental de la production du produit de traitement et par son transport. L'étude de sensibilité a par ailleurs montré que la variante ayant les impacts environnementaux les plus faibles l'était également quand des hypothèses très pénalisantes étaient retenues. Le traitement du limon de Moussy au lignosulfonate présente donc un intérêt technique dont la mise en œuvre induit une forte dégradation du bilan environnemental global.

L'étude montre ainsi qu'un traitement n'apporte pas systématiquement un avantage environnemental mais que son intérêt dépend spécifiquement des variantes non traitées qu'il est susceptible de remplacer. Le cas du traitement du limon à la Permazyme illustre bien ce fait car son intérêt environnemental dépend principalement des choix techniques retenus. Le point essentiel est donc d'identifier la variante constructive remplacée par la variante traitée et par ce biais de contraindre l'étude pour qu'elle soit la plus réaliste possible.

Lors de l'analyse des impacts, il est également nécessaire d'adopter une vision d'ensemble des indicateurs sans toutefois négliger les effets observés sur un indicateur donné. Il est par exemple possible que l'essentiel des indicateurs environnementaux se trouve amélioré à l'exception d'un ou deux d'entre eux. Ainsi, lors du traitement du limon à la Permazyme dans la situation n°1, la consommation d'eau est réduite de 45 m³ alors que la production de déchets solides augmente de 2,8 kg. Dans ce cas, il est essentiel d'estimer l'importance de la dégradation de ces indicateurs. Un élément de comparaison est alors nécessaire. L'une des possibilités consiste à comparer l'impact calculé à l'impact moyen d'une personne sur une année. L'étude de sensibilité permet également de quantifier l'effet d'une modification des hypothèses sur le bilan environnemental et de tester par ce biais la robustesse des conclusions dressées lors de l'identification de la variante ayant le plus faible impact.

Au cours de l'étude, il faut aussi garder à l'esprit que les bilans environnementaux calculés sont valables dans le contexte des connaissances actuelles. Les évolutions des techniques de production, la tendance à concevoir des moteurs plus économes, limitant les émissions de polluants, ou l'arrivée de moteurs électriques nécessitera de réactualiser les données d'ICV et aura un impact sur les bilans environnementaux calculés. De plus, des processus jugés propres ou économes à l'heure actuelle pourraient se révéler très préjudiciables dans le futur (pollution sous estimée, effet méconnu sur la santé ou sur l'environnement de certaines substances). En cela, les conclusions de l'étude environnementale ne sont en rien définitives et devront être réactualisées en fonction des connaissances futures.

Au final, un schéma synthétique permet d'illustrer la démarche technique et environnementale suivie. Ce schéma n'est pas réalisé de façon spécifique par rapport aux produits non traditionnels, mais peut être aisément étendu aux situations dans lesquelles un choix technique et environnemental doit être effectué entre plusieurs variantes (schéma ci-dessous). Il s'agit en effet d'évaluer dans quelle mesure le choix d'un traitement permet d'atteindre un objectif technique donné.

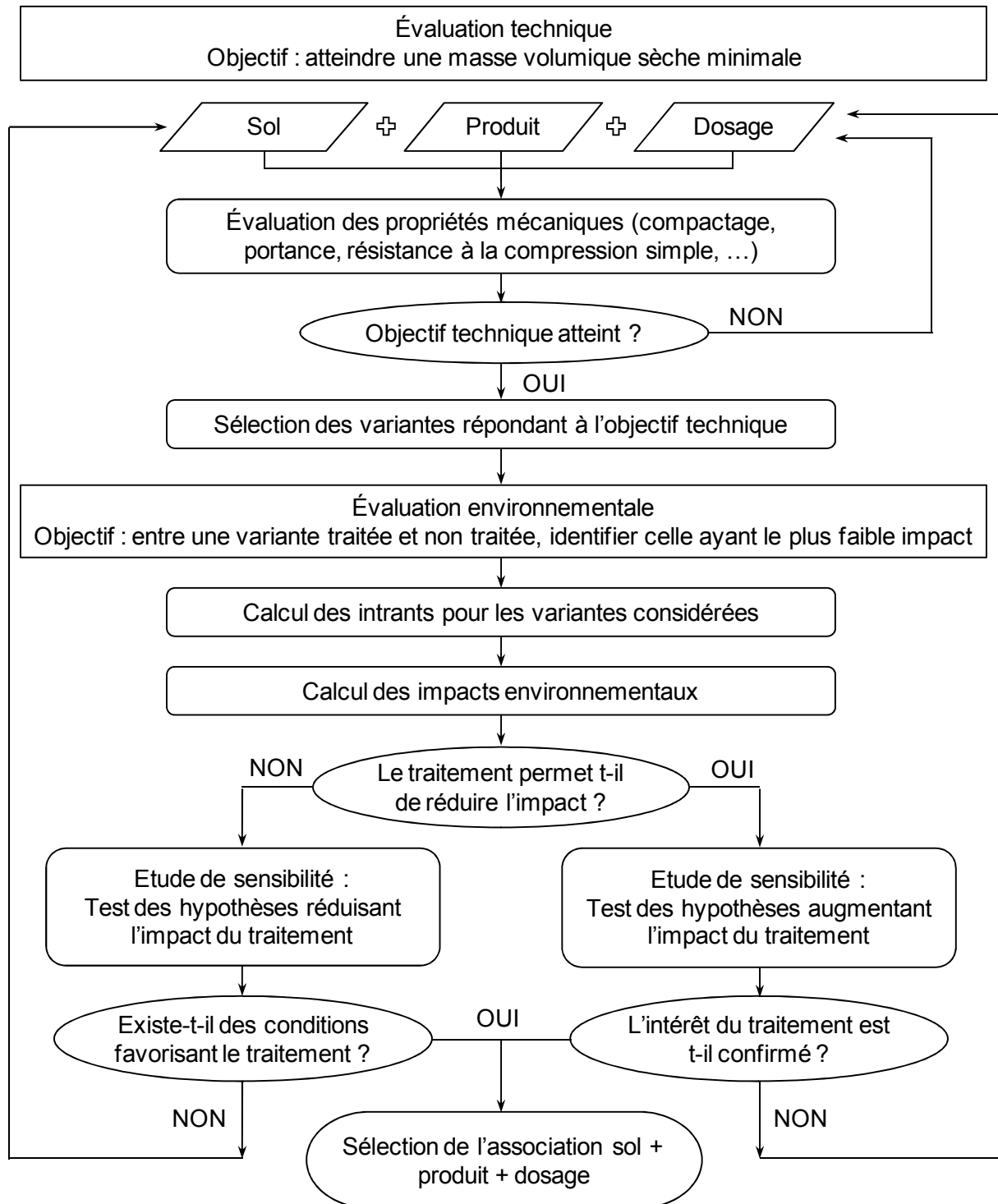


Schéma généralisé de la démarche suivie lors de l'étude

Pour les traitements non traditionnels, l'objectif recherché était d'atteindre une masse volumique sèche et une portance minimale. Si plusieurs variantes permettent de satisfaire cet objectif, l'évaluation environnementale permettra éventuellement de différencier les variantes. La première étape consiste alors à définir un système puis à calculer et comparer les intrants. S'en suit le calcul des impacts environnementaux de chacune des variantes dont le résultat permet d'aboutir à une première conclusion. Avant d'arriver à une conclusion finale, il est toutefois nécessaire d'effectuer une étude de sensibilité sur l'effet des différentes hypothèses prises lors des calculs. L'étude de sensibilité permet alors d'évaluer dans quelle mesure ces hypothèses influent sur le résultat et amènent à une modification des conclusions préalables. À l'issue de l'étude de sensibilité, un choix tenant compte des aspects techniques et environnementaux est effectué.

Quelques perspectives supplémentaires peuvent être discutées.

- Techniquement, il serait intéressant de poursuivre les recherches sur le compactage des sols secs via un traitement avec des produits tensioactifs. Cette approche permettrait à la fois de réduire les incertitudes et variabilités liées à la composition des produits et devrait également permettre de réduire le coût du traitement, certains tensioactifs étant moins coûteux.
- Sur le bilan environnemental, le développement de la méthode et de son acceptation passe nécessairement par l'utilisation de données communes et d'une méthodologie acceptée par l'ensemble des acteurs du secteur. La mise en commun de données d'ICV faisant le plus largement consensus est également nécessaire afin de réduire le temps alloué à la collecte de ces données, phase très chronophage lors de la réalisation d'une ACV.
- La mise en œuvre *in situ* d'une variante traitée permettrait de vérifier le comportement du sol traité en vraie grandeur. Un suivi des caractéristiques de portances dans les premiers jours après construction serait particulièrement intéressant car en partie lié à la dégradation du produit. De plus, la construction d'un ouvrage en vraie grandeur serait l'occasion de détailler et d'affiner la méthode environnementale proposée en se référant au fonctionnement et aux performances réels des engins.

c) Synthèse

Les études techniques, environnementales et économiques montrent que le choix d'une variante nécessite fréquemment d'arriver à un compromis entre les différents aspects pris en compte. Les résultats obtenus pour les traitements non traditionnels sont une bonne illustration de cette nécessité. En effet, les traitements ont montré qu'ils pouvaient apporter des avantages techniques lors de la mise en œuvre du sol. Cependant, ces avantages doivent également être reconsidérés en fonction des aspects environnementaux et financiers. Ainsi, dans un contexte décrit comme favorable à l'utilisation de produits non traditionnels, les intérêts techniques mis en avant pour certains traitements se trouvent contrebalancés par des impacts

environnementaux plus élevés. Dans certaines configurations, au contraire, l'intérêt technique se conjugue avec un intérêt environnemental, mais pas nécessairement financier comme illustré par le traitement à la Permazyme dans la situation n°1, dont le coût de mise en œuvre est plus élevé que celui de la variante non traitée. Il est ainsi courant d'avoir à faire un choix entre avantages techniques, environnementaux et économiques. Ce choix peut être guidé par de nombreux aspects mais est généralement difficile à prendre de façon absolue et tend vers la recherche du meilleur compromis en fonction notamment du contexte dans lequel la réalisation de l'ouvrage est prévue.

Références bibliographiques

- Adalberth K., Almgren A., Peterson E.H. (2001), "Life-cycle assessment of four multi-family buildings", International journal of low energy and sustainable buildings, Vol. 2, pp. 1-21.
- Addo J.Q., Sanders T.G., Chenard M. (2004), "Road dust suppression: effect on maintenance, stability, safety and the environment" Phases 1-3, MPC04-156.
- AFNOR, Fascicule de documentation FD P01-015 (2006), « Qualité environnementale des produits de construction – Fascicule de données énergie et transport ».
- AFNOR NF ISO 10390 (2005), « Qualité du sol - Détermination du pH ».
- AFNOR NF EN ISO 14040 (2006a), « Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Principes et cadre ».
- AFNOR NF EN ISO 14040 (2006b), « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices ».
- AFNOR NF P01-010 (2004), « Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ».
- AFNOR NF P11-300 (1992), « Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. ».
- AFNOR NF P18-558 (1990), « Granulats – Masse volumique des fines ».
- AFNOR NF P 94-093 (1999), « Reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié ».
- AFNOR NF P 94-057 (1992), « Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation ».
- AFNOR NF P 94-068 (1998), « Sols : Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache ».
- AFNOR NF P 94-077 (1997), « Sols : Reconnaissance et essais - Essai de compression uniaxiale ».
- AFNOR NF P 94-078 (1997), « Sols : Reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans un moule CBR ».
- AFNOR NF P 94-048 (1996), « Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre ».

- AFNOR NF P 94-052-1 (1995), « Détermination des limites d'Atterberg. Partie 1 : Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration ».
- AFNOR NF P 94-041 (1995), « Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique – Méthode de tamisage par voie humide ».
- AFNOR NF P 94-051 (1993), « Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau ».
- Askvik K.M., Gundersen S.A., Sjöblom J., Merta J. et Stenius P. (1999), "Complexation between lignosulfonates and cationic surfactants and its influence on emulsion and foam stability", *Colloids and Surfaces, A : physicochemical and Engineering Aspects*, No. 159, pp. 89-101.
- ASTM D4546-96 (1996), "Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils".
- ASTM D 5298-94 (1995) "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper".
- Baize D., Saby N., Deslais W. (2007), « Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France – Résultats d'une collecte de données à l'échelon national », ADEME – GIS Sol – INRA, 49 p.
- Bare J.C. (2011), "TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0", *Clean Technologies and Environmental Policy*, pp. 1-10.
- Bare J.C., Norris G.A., Pennington D.W., McKone T.E. (2003), "TRACI, the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 6, pp. 49-78.
- Bare J.C., Hoffstetter P., Pennington D.W., Udo de Haes H.A. (2000), "Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits", *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 5, Nr. 6, pp. 319-326.
- Berney E.S. IV, Peters J.F., Newman J.K., Smith D.M. (2003), "Effect of surfactant on the dry-side compaction of silty sand" *Journal of the Transportation Research Board* No. 1819, pp. 57-62.
- Bishop M., Barren A.R. (2006) "Cement hydration inhibition with sucrose, tartaric acid and lignosulfonate: Analytical and spectroscopic study", *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 45, Nr. 21, pp. 7042-7049.
- Bolander P., Yamana A. (1999), "Dust palliative selection and application guide", U.S. Department of Agriculture Forest Service, 19 p.
- Börjesson P., Gustavsson L. (2000), "Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives", *Energy Policy*, Vol. 28, pp. 575-588.

- Bribian I.Z. Uson A.A., Scarpellini S. (2009), "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 2510-2520.
- Carignan J., Hild P., Mevelle G., Morel J., Yeghicheyan D. (2001), "Routine Analyses of Trace Elements in Geological Samples using Flow Injection and Low Pressure On-Line Liquid Chromatography Coupled to ICP-MS: A Study of Geochemical Reference Materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH", *Geostandards Newsletter*, Vol. 25, Nr. 2-3, pp. 187-198.
- Chen J., Anandarajah A., Inyang H. (2000), "Pore fluid properties and compressibility of kaolinite", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 126, No. 9, pp. 798-807.
- Chowdhury R., Apul D., Fry T. (2010), "A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, pp. 250-255.
- Cimbéton (2010), « Analyse du cycle de vie d'un pont en béton – Exemple d'application pour un pont courant », Collection technique Cimbéton n°T87.
- Comité National des Coproduits (2003), fiche n°8 « Coproduits de la betterave – mélasse de betterave et de canne » 23 p.
- Comité National des Coproduits (2003), fiche n°10 « Coproduits de la betterave – vinasse de mélasse de betterave » 16 p.
- Di Maio C., Santoli L., Schiavone P. (2004), "Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state", *Mechanics of Materials* Vol. 36, pp. 435-451.
- DIN EN ISO 9888 (1999), "Water quality - Evaluation of ultimate aerobic biodegradability of organic compounds in aqueous medium - Static test (Zahn-Wellens method)".
- Dong X., Wang Y-H. (2008), "The effects of the pH-influenced structure on the dielectric properties of kaolinite-water mixtures", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 72, Nr. 6, pp. 1532-1541.
- Du Noüy P.L. (1919), "A new apparatus for measuring surface tension", *The journal of general physiology*, Vol. 1, Nr. 5, pp. 521-524.
- Erlandsson M., Borg M. (2003), "Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs", *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 919–938.
- Eurostat (2008), "Generation of waste", last update 06 March 2012. Consulté en ligne http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en

- Fevre-Gautier A.-L., Vaxelaire S., Beylot A., Michel P., Brullot S., Lannou G., Stoos M. (2012), "Construction projects using alternative materials: a framework to assess their sustainability", Wascon 2012 Conference Proceedings.
- Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D., Suh S. (2009), "Recent developments in Life Cycle assessment", *Journal of Environmental Management* 91, pp. 1-21.
- FNTP (2011), Fédération Nationale des Travaux Publics, « Recueil de statistiques 2010 – TP Informations n°69 ».
- Gautheyron J., Turenne M., Turenne J.F. (1978), « Effet de l'épandage de résidus de distillerie en plain champ » Caribbean food crops society, XVth Meeting, 13p.
- Geiman C.M. (2005), "Stabilization of soft clay subgrades in Virginia : Phase I laboratory study", M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., Van Zelm R. (2009), "ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level", First edition Report I: Characterisation; <http://www.lcia-recipe.net>.
- Goedkoop M.J., Spriensma R. (2000), "The Eco-Indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment", Methodology Report, second edition, The Netherlands.
- Gow A.J., Davidson D.T., Sheeler J.B. (1961), "Relative effects of chlorides, lignosulfonates and molasses on properties of a soil-aggregate mix" Highway research board bulletin, Vol. 282, pp. 66-83.
- Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France, Valorisation des excédents de déblais de travaux publics, 2003.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppés G., Kleijn R., de Koning A., v. Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., de Bruijn H., v. Duin R., Huijbregts M.A.J. (2002), "Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards" Serie: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers.
- Harris P., J v. Holdt, Sebesta S., Scullion T. (2006), "Recommendations for stabilization of high-sulfate soils in Texas" Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, No. 1952, Washington D.C., pp. 71-79.
- Hauschild M.Z., Potting J. (2005), "Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology", Environmental News No. 80, The Danish Ministry of the Environment.

- Hirsinger F., Schick K.P., (1995) "A life cycle inventory for the production of alcohol sulphates in Europe", *Tenside Surfactants Detergents*, No. 2, 1995, pp. 128-139.
- Hoffman G.R., Becher J., Swanson J.W. (1968), "Molecular structure of lignosulfonates – Mechanical and adhesional behavior", The institute of paper chemistry, project 2421 – Report Nr. 7.
- Hoover J.M., Bergerson K.L., Fox D.E., Denny C.K., Handy R.L. (1973), "Surface improvement and dust palliation of unpaved secondary roads and streets", Final report, Iowa Highway Research Board Project HR-151.
- Houghton J.T., Meira Filho L.G., Bruce J., Lee H., Callander B.A., Haites E., Harris N., Maskell K. (1994), "Climate change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 Emission scenarios", Cambridge University Press, Cambridge.
- Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K. (1996), "Climate change 1995: the science of climate change" Cambridge University Press, Cambridge.
- Hower W.F. (1970), "Adsorption of surfactants on montmorillonite", *Clays and clay minerals*, Vol. 18, pp. 97-105.
- Indraratna B., Muttuvel T., Khabbaz H., Armstrong R.,(2008), "Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, pp. 837-844.
- Ingles O.G., Metcalf J.B. (1973), "Soil stabilization: principles and practice", 374 p., Wiley Edition.
- Itsubo N., Inaba A. (2003), "A new LCIA method: LIME has been completed" *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 8, p 305.
- JECFA 69th Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (2008), Toledo M.C.F., Kuznesof P.M., "Calcium lignosulfonate (40-65) - Chemical and technical assessment".
- Jolliet O. (2003), "Overview of the LCIA work meeting results in Vienna, Tsukuba and Barcelona", *Life Cycle Impact Assessment Definition Study: Background Document II*. UNEP-SETAC.
- Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R. (2003), "IMPACT 2002+ : a next life cycle impact assessment methodology" *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8, pp. 324-330.
- Käärik A.A. (1974), "Decomposition of wood" C.H. Dickinson & G.J.F., Edition Pugh, Academic Press, Vol.1, pp. 129-174.
- Katz L.E., Rauch A.F., Liljestrand H.M., Harmon J.S., Shaw K.S., Albers H. (2001), "Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer", *Transportation*

- Research record : Journal of the Transportation Research Board, No. 1757, Washington D.C., pp. 50-57.
- Kestler M.A. (2009), "Stabilization selection guide for aggregate and native-surfaced low volume roads", U.S. Department of Agriculture Forest Service, 156 p.
- Lambe T.W. (1956), "Improvement of soil properties with dispersants" Boston Society Civil Engineers Journal, Vol. 41, n°2, pp. 184-207.
- LCPC-SETRA (2004), « Traitement des sols à la chaux et ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et couches de forme » Guide technique.
- LCPC-SETRA (2000), « Réalisation des remblais et des couches de forme », Guide technique, fascicules I et II, seconde édition.
- Li X., Zhu Y., Zhang Z. (2010), "An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes", Building an Environment 45, pp. 766-775.
- Lunsford Lt.G.B., Mahoney J.P. (2001), "Dust Control on Low Volume Road", Federal Highway Administration, Report No. FHWA-LT-01-002, 59 p.
- Maher M., Marshall C., Harrison F., Baumgaertner K., (2005), "Context Sensitive Roadway Surfacing Selection guide", Federal Highway Administration, Report No. FHWA-CFL/TD-05-004, 354 p.
- Ministère en charge de l'écologie (2009), « Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voiries et espace public urbain ».
- Merritt E. (1991), "Chemical soil stabilization", United States Patents Nr. 5000789, 4 p.
- Mitchell J. (1993), "Fundamentals of soil behavior", 2ème Edition John Wiley & Sons.
- Modahl I.S., Vold B.I. (2011) "The 2010 LCA of cellulose, ethanol, lignin and vanillin from Borregaard Sarpsborg", Ostfold Research, ISBN no. 978-82-7520-634-1, 78 p.
- Monteiro H., Freire F. (2012), "Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods", Energy and Buildings, Vol. 47, pp. 572–583.
- Mroueh U.-M., Eskola P., Laine-Ylijoki J. (2001), "Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction", Waste Management 21, pp. 271-277.
- Muench S.T. (2010), "Roadway construction sustainability impacts: review of life cycle assessment", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, pp. 36-45.
- Nachtergal C. (1988), « Agenda du bâtiment », Éditions de Boeck Université, 632 p.

- Naeini S.A., Ghorbanalizadeh M. (2010), "Effect of wet conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer", *Journal of Applied Sciences*, Nr. 10, Vol. 22, pp. 2839-2846.
- Palmer J.T., Edgar T.V., Boresi A.P. (1995), "Strength and density modification of unpaved road soils due to chemical additives", Master Thesis, University of Wyoming, Laramie.
- Palomino A.M., Santamarina J.C. (2005), "Fabric map for kaolinite: effects of pH and ionic concentration on behavior", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 53, No. 3, pp. 211-223.
- Park J. Vipulanandan C., Jee Wong Kim, Myoung Hak Oh (2006), "Effects of surfactants and electrolyte solutions on the properties of soil", *Environmental geology*, Vol. 49, no. 7, pp. 977-988.
- Parsons R.L., Milburn J.P. (2003), "Engineering behavior of stabilized soils" *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, No. 1837, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-29.
- Peck G.M., (1963), Discussion to session 11, 4th Australian N.Z. conference on soil mechanics, in "Soil Mechanics", edited by Lee I.K.
- Pettersen R.C. (1984), "The chemical composition of wood – Chapter 2", *American Chemical Society*, pp. 57-126.
- Petry T.M., Jiang C.P. (2007), "Soil suction and behavior of chemically treated clays", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2026, Washington D.C., pp. 30-38.
- Pittinger C.A., Sellers J.S., Janzen D.C. Koch D.G., Rothgeb T.M., Hunnicutt M.L. (1993) "Environmental life-cycle inventory of detergent-grade surfactant sourcing and production", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 70, no. 1, pp 1-15.
- Rajendran D., Lytton R.L. (1997), "Reduction of sulfate swell in expansive clay subgrade in the Dallas district" *Research Report TX-98/3929-1*, Texas Transportation Institute, College Station.
- Piccolo A., J.S.C. Mbagwu, (1989), "Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates", *Soil science*, Vol. 147, No. 1, pp. 47-54.
- Ramachandran V. (1995) "Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology", Noyes Publications: Park Ridge.
- Rauch A.F., Harmon J.S., Katz L.E., Liljestrand H.M. (2002), "Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay", *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, No. 1787, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., pp. 33-41.

- Rauch A.F., Katz L.E., Liljestrand H.M. (2003), "An analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers: Volume 1", Report FHWA/TX-03/1993-1, Center for transportation research, University of Texas, Austin.
- Sanders T.G., Addo J.Q. (1993), "Effectiveness and environmental impact of road dust suppressants", Department of civil engineering, Colorado State University.
- Santoni R.L., Tingle J.S., Webster S.L. (2002), "Stabilization of silty sand with nontraditional additives" *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1787, Washington, D.C., pp. 61-70.
- Sarkar S.L., Bruce E.H., Sharlin R.J. (2000), "Injection stabilization of expansive clays using a hydrogen ion exchange chemical", *Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000, Advances in Unsaturated Geotechnics*, Vol. 287, pp. 487-516.
- Sartori I., Hestnes A.G. (2007), "Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: a review article", *Energy and Buildings*, Vol. 39 pp. 249-57.
- Scholen D.E. (1992), "Nonstandard Stabilizers", Federal Highways Administration, Report No. FHWA-FLP-92-011.
- Scholen D.E. (1995), "Stabilizer Mechanisms in Nonstandard Stabilizers" *Conference Proceedings 6: Sixth International Conference on Low-Volume Roads*, Vol. 2, TRB National Research Council, Washington, D.C., pp. 252-260.
- Scullion T. (2002), "Identifying the benefits of nonstandard stabilizers in high sulfate clay soil: a status report".
- Sharma A., Saxena A., Sethi M., Shree V., Varun (2011), "Life cycle assessment of buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 871-875.
- Sheeler J.B., Ogilvie J.C., Davidson D.T. (1957), "Stabilization of loess with aniline-furfural", *Proceedings of the annual meeting - Highway Research Board*, Vol. 36, pp. 755-772.
- Sjöström E. (1993), "Wood Chemistry, fundamentals and Applications" second edition, 293 p.
- Sokolovich V.E. (1973), "Acid as chemical stabilizers of clay soils", *Scientific Research Institute of Foundations*, No. 4, pp. 22-23.
- Stalmans M., Berenbold H., Berna J.L., Cavalli L., Dillarstone A., Franke M., Hirsinger F., Janzen D., Kosswig K., Postlethwaite D., Rappert T., Renta C., Scharer D., Schick K.-P., Schul W., Thomas H., Van Sloten R. (1995) "European life-cycle inventory for detergent surfactants production", *Tenside surfactant detergent*, Vol. 32, no. 2, pp. 84-109.
- Steen B. (1999), "A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000-General System Characteristics / Models and data of the default method" CPM Report 1999, Gothenburg, Sweden.

- Surdahl R.W., Woll J.H., Marquez H.R. (2007), "Stabilization and dust control at the Buenos Aires national wildlife refuge, Arizona", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1989, Vol.1, Washington D.C., pp. 312-321.
- Tingle J.S., Santoni R.L. (2003), "Stabilization of clay soils with nontraditional additives" *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1819, Vol.2, Washington D.C., pp. 72-84.
- Tingle J.S., Larson S.L., Weiss C.A., Newman J.K., Peters J.F., Tardy B., E.S. Berney IV (2004), "Constitutive analyses of nontraditional stabilization additives", Technical Report ERDC TR-04-5, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg.
- Tingle J.S., Newman J.K., Larson S.L., Weiss C.A., Rushing J.F. (2007), "Stabilization mechanisms of nontraditional additives", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1989, Vol.2, Washington D.C., pp. 59-67.
- Troccon J.L., Demarquilly C. (1989), « La vinasse de mélasse de betteraves pour les ruminants » INRA Productions. Animales., Vol. 2, fascicule 4, pp. 245-248.
- Trufanova M.V., Parfenova L.N., Yarygina O.N. (2010), "Surfactant properties of lignosulfonates", *Russian Journal of Applied Chemistry*, Vol. 83, No.6, pp. 1096-1098.
- Velasquez R.A., Marasteanu M.O., Holzalski R.M., Clyne T. (2005), "Preliminary laboratory investigation of enzyme solutions as a soil stabilizer", Final Report, University of Minnesota, Department of Civil Engineering.
- Velasquez R.A., Marasteanu M.O., Holzalski R.M. (2006), "Investigation of the effectiveness and mechanisms of enzyme products for subgrade stabilization", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.7, No. 3, pp. 213-220.
- Vinod J.S., Indraratna B., Mahamud M.A.A. (2010), "Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture", *Proceedings of the institution of civil engineers: Ground Improvement*, Vol. 163, pp. 43-51.
- Visser A.T. (2007), "Procedure for evaluating stabilization of road materials with nontraditional stabilizers" *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1989, Vol.2, Washington D.C., pp. 21 – 26.
- Wadhawan S.K., Datta A.K. (1965), "Aniline-furfural as soil stabiliser", *Defense science journal*, Vol. 15, pp. 282-286.
- Wenzel H., Hauschild M.Z., Alting L. (1997), "Environmental assessment of products. Methodology, tools, techniques and case studies" vol. 1 Chapman & Hall, UK, Kluwer Academic Publishers, 544 p.
- Wieland E. & Stumm W. (1992), "Dissolution kinetics of kaolinite in acidic aqueous solutions at 25°C", *Geochimica Cosmochimica Acta* Vol. 56, pp. 3357-3363.

Wright Fox R., Macfarlane J.G., Bibbens R.F. (1993), "Alternate chemical soil stabilizers", Minor Research Report.

Yeoh N.S., Oades J.M. (1981), "Properties of soils and clays after acid treatment. I Clay Minerals", Australian Journal of Soil Research Vol. 19, Nr. 2, pp. 147-158.

Utilisation de produits non traditionnels pour le traitement des matériaux de terrassement : impact sur les propriétés géotechniques et bilan environnemental

Résumé : Répondre aux défis du développement durable exige la prise en considération des aspects économiques, sociétaux et environnementaux des projets. Dans le domaine des terrassements, les actions portent notamment sur l'optimisation de la valorisation des matériaux extraits grâce aux techniques de traitement des sols. Le projet s'est principalement porté sur les produits de traitement dérivant de la transformation de matières premières renouvelables : solutions « enzymatiques », lignosulfonates et solutions acides. Des données factuelles concernant les effets des traitements sur les caractéristiques hydromécaniques de quatre sols (un limon, un sol argileux et deux sables) ont été acquises mettant en évidence une augmentation de l'efficacité du compactage après traitement du limon au produit enzymatique et au lignosulfonate. La recherche des mécanismes d'action s'est fondée sur une étude de la microstructure par microscopie électronique à balayage et porosimétrie au mercure complétée par l'évaluation des effets d'un ajout de produits tensioactifs sur les propriétés des sols. L'objectif de l'étude dépasse cependant l'évaluation des modalités d'action des produits et vise également à prendre en compte les préoccupations environnementales. Ainsi, une étude d'analyse du cycle de vie a été menée pour chaque application ce qui a permis d'identifier les conditions optimales pour lesquelles les traitements combinent intérêts techniques et environnementaux. Ces conditions sont réunies lors du compactage des sols secs sous réserve que l'étape de production et de transport des produits ne soit pas excessivement pénalisante comme mis en évidence lors de l'étude de sensibilité.

Mots clefs : Terrassement, traitement des sols, produits non traditionnels, compactage, sols secs, tensioactifs, impact environnemental, analyse du cycle de vie, étude de sensibilité.

Soil treatment with non-traditional additives: impact on geotechnical properties and environmental assessment

Abstract: Sustainable development principles lead earthworks companies to use all natural materials and to reduce the environmental impact of their activities. In this context, the use of industrial organic products derived from the processing of renewable matter has been proposed. In this study, three non traditional products have been selected: an enzymatic solution, a lignosulfonate and an acid solution. In a first approach, hydromechanical properties of four treated soils (a silt, a clayey soil and two sands) were investigated. The experimental results showed interesting applications for the silt when its natural water content is low. Indeed, the compaction ability of the soil was increased after enzymatic and lignosulfonate treatments. Thus, savings of water and energy could be expected during the construction stage. To gain a better understanding of the mechanisms of the treatment products, the microstructure of treated soil were investigated with scanning electron microscopy, mercury injection porosity and was completed by the study of a surfactant addition in soils. The global aim of the study was beyond the characterization of mechanical behavior of treated soils, therefore, environmental balance was also estimated for the different applications defined in accordance to the experimental results. For enzymatic and lignosulfonate treatments, a comparison of the global environmental impact was done thanks to a life cycle assessment methodology. This approach showed that technical and environmental interest are associated for the compaction of dry soils when the production and transport steps have limited environmental impact as demonstrated in the sensitivity analysis.

Key words: Earthworks, soil treatment, non-traditional products, compaction, dry soil, surfactant, environmental impact, life cycle assessment, sensitivity analysis.